

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ

Учебное пособие

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 66.081.2
Е78

Рецензент:
Л.И. Лукина – к.х.н., доцент

Ерофеев В.А.

Е78 Методы и средства контроля газоаэрозольных выбросов: учеб. пособие / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина ; Министерство науки и высшего образования РФ, Севастопольский государственный университет, Институт ядерной энергии и промышленности. - изд. 2-е, испр. и перераб. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 167 с. – Текст : электронный.

Предназначено для студентов, изучающих основные принципы радиометрии и радиохимии, методы измерения радионуклидов и будет интересно для лиц, изучающих средства и способы снижения и контроль газовой и аэрозольной активности, а также современные установки и системы радиационного контроля, в том числе интегрированные в автоматизированную информационно-вычислительную систему радиационного контроля на АЭС.

Изложены методы и средства очистки, обеспечивающие снижение газовой и аэрозольной активности, а также средства и методы их измерения с использованием современной аппаратуры.

Кратко освещены основные нормативные и законодательные акты, которых необходимо придерживаться при работе и оценке безопасности при работе с радиоактивными газами и аэрозолями.

УДК 66.081.2

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано на заседании ученого совета Института ядерной энергии и промышленности, протокол № 7 от 12 февраля 2020 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Основные понятия и определения	6
1 Нормативно-правовая база обращения с радиоактивными газами и аэрозолями	8
1.1 Обращение с газообразными радиоактивными отходами	10
1.2 Значения допустимых уровней радиационного воздействия	11
2. Радиометрия газов и аэрозолей	13
2.1 Общее понятие, принципиальная схема работы ядерного реактора и основные характеристики	13
2.1.1 Схема построения ВВЭР	13
2.1.2 Процессы, протекающие в теплоносителе	21
2.1.3 Контроль состояния защитных барьеров	33
2.1.4 Технические средства и методы контроля радиоактивных выбросов	40
2.2. Методы снижения радиоактивных газов и аэрозолей	50
2.2.1 Методы очистки	50
2.2.2 Адсорбционные свойства цеолитов	55
2.2.3 Средства очистки радиоактивных газов и аэрозолей	67
2.2.4 Система спецгазоочистки	90
2.3 Приборы контроля газоаэрозольных выбросов	96
Литература	105
Вопросы для самоконтроля	106
Список сокращений	111
Приложения	112

ВВЕДЕНИЕ

Радиометрия ионизирующих излучений включает круг вопросов, связанных с применением радиометрических и спектрометрических методов в решении различного рода задач во многих областях науки и техники, а также в вопросе разработки специальной современной аппаратуры и совершенствованию различных методов измерения радиоактивности и идентификации радиоизотопов.

С развитием ядерной энергетики появилась необходимость контроля над распространением радиоактивных элементов, родоначальником которой является известный физик Л.Н. Богоявленский.

Необходимость контроля и измерения радона привело к созданию эманационного метода и аппаратуры контроля.

Практическое применение получила радиометрическая аппаратура в исследовании искусственной радиоактивности получения радиоактивных изотопов.

На современном этапе развития ядерного приборостроения радиометрия прочно вошла в практику контроля выбросов и сбросов и измерений радиоизотопов ядер тяжелых элементов, осуществляя технологический контроль состояния герметичности контуров АЭС и газоаэрозольных выбросов, а также больше практическое применение нашли сцинтилляционный и полупроводниковый методы в ядерной спектрометрии.

Данная работа направлена на обобщение и систематизацию методов и средств контроля газоаэрозольных выбросов. Материал изложен в объеме практического применения в использовании радиометрической и спектрометрической аппаратуры.

Раздел второй посвящен причинам образования и распространение радиоактивных газов и аэрозолей, их основным свойствам. Уделено внимание построению ядерных реакторов типа ВВЭР, процессам, протекающим в теплоносителе, условные физические барьеры, на которых определяются состояния герметичности контуров по их активности с помощью средств контроля. Данный раздел взят из учебного пособия «Средства и методы очистки радиоактивных газов и аэрозолей / Севастополь, СНУЯЭиП, 2012. – 144 с.» авторов Мюсельмян Г.А, Черкашина Н.И.

Изложены существующие средства контроля газоаэрозольных выбросов, методы их очистки, адсорбции, уделено внимание средствам снижения газоаэрозольной активности при их превышении и установленную на АЭС систему спецгазоочистки.

В связи с получением Радиометрией самостоятельности, как дисциплине, дающей понимание проведения измерений ионизирующего излучения (ИИ) веществ в различных агрегатных состояниях различными

методами, обеспечивается безопасность персонала, работающего с источниками ИИ.

Понимание работы средств измерения ионизирующих излучений и достоверности показаний аппаратуры привело к созданию современной и интеллектуальной аппаратуры радиационного контроля.

В основу написания данного учебного пособия легли нормативные документы по обращению с радиоактивными газообразными отходами и учебник Е.И. Коптелова и Г.И. Котивец «Радиометрия». Выражаем свою благодарность авторам, разрешивших использовать вышеупомянутый материал в написании данного учебного пособия.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Радиометрия – (от радио... и ...метрия), совокупность методов измерений активности (числа распадов в единицу времени) нуклидов в радиоактивных источниках. Родоначальниками радиометрии можно считать Э. Резерфорда и Х. Гейгера, впервые в 1930 г. осуществивших с помощью искрового счётчика определение числа α -частиц, испускаемых в 1 секунду 1 г Ra (удельная активность).

Активность радионуклида удельная – отношение активности радионуклида в радиоактивном образце к массе образца.

Активность радионуклида объемная – отношение активности радионуклида в радиоактивном образце к объему образца.

Дозиметр – прибор для измерения дозы и/или мощности дозы ионизирующего излучения и/или энергии, переносимой ионизирующим излучением или переданной им объекту, находящемуся в поле его действия.

Ионизирующее излучение – потоки заряженных частиц высокой энергии, которые непосредственно или косвенным путем вызывают ионизацию вещества.

Источник ионизирующего излучения – устройство или вещество, уровень ионизирующего излучения от которого требует применения по отношению к нему норм и правил обеспечения радиационной безопасности.

Контроль радиометрический – определение содержания радионуклидов на поверхности кожных покровов, одежды, обуви, предметов в воздухе, в воде, пищевых продуктах, строительных материалах, на других поверхностях и в средах. Результаты контроля используются для сопоставления с производными показателями нормирования активности.

Радиохимия – наука о качественных изменениях радиоактивных изотопов под влиянием изменения количественного состава ядра.

Единицы радиоактивности – в системе СИ единицей радиоактивности является 1 беккерель равный 1 распаду в 1 секунду $1\text{Бк} = 1 \frac{\text{расп.}}{\text{сек.}}$
внесистемная единица 1 кюри (Ки), $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Радиоактивный элемент – совокупность радиоактивных атомов с одинаковым зарядом ядра и различной массой (например, ^{235}U , ^{238}U и т.п.).

Радиоактивный нуклид – это вид радиоактивных атомов с одинаковым зарядом ядра и одинаковой массой (^{226}Ra , ^{238}U , ^{239}Pu).

Радиохимический анализ (РХА) – это определение качественных и количественных соотношений радиоактивных нуклидов, достигаемое путем сочетания различных специфических методов выделения, разделения и идентификации радионуклидов, находящихся в различных системах.

Радиоактивность – представляет собой самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемые испусканием различных частиц.

Нуклидами называют атомы или ядра с данным числом нуклонов и данным зарядом ядра.

Изотопы – нуклиды, имеющие одинаковое число протонов ($A=\text{const}$), они различаются только числом нейтронов. Поэтому все изотопы принадлежат к одному и тому же химическому элементу.

Аппаратура контроля радиационной обстановки (аппаратура КРО) – совокупность технических средств, предназначенных для контроля радиационных параметров.

Радиоактивный распад – переход неустойчивых (радиоактивных) ядерных систем в более устойчивое состояние в результате самопроизвольного (спонтанного) распада.

Детектор – чувствительный элемент, предназначенный для преобразования энергии ионизирующего излучения в другой вид энергии, удобный для регистрации и/или измерения одной или нескольких величин, характеризующих воздействие излучения на детектор.

Источник радиационный – электрофизическое не радионуклидное устройство (рентгеновская трубка, ускоритель, генератор и т.д.), в котором ионизирующее излучение возникает за счет изменения скорости заряженных частиц, их аннигиляции или ядерных реакций.

Источник радионуклидный – источник ионизирующего излучения, содержащий радионуклид или смесь радионуклидов.

Контроль дозиметрический – измерение мощностей доз излучений на производстве, определение эквивалентных и эффективных, накопленных, индивидуальных и коллективных доз облучения от различных источников ионизирующего излучения, с целью сопоставления с установленными нормативами облучения и контрольными уровнями.

Контроль с отбором проб – способ получения информации о контролируемом параметре, при котором в установленном порядке происходит предварительный отбор и(или) подготовка пробы (отбор жидкости в кювету, прокачивание воздуха через фильтр, выпаривание, концентрирование, радиохимическое выделение нуклида и т.п.).

Контролируемый радиационный параметр – физическая величина, характеризующая поля ионизирующих излучений, источники ионизирующих излучений и результаты взаимодействия ионизирующих излучений со средой, используемая для оценки состояния РО.

Метод измерений – способ решения измерительной задачи, характеризуемый его теоретическим обоснованием и разработкой основных приемов применения средств измерений (т.е. совокупность приемов использования принципов и средств измерений).

Рабочее место – место (помещение) пребывания персонала для выполнения производственных функций в течение не менее половины

рабочего времени или двух часов непрерывно. Если работа осуществляется в различных участках помещения, то рабочим местом считается наиболее радиационноопасный участок.

Радиоактивное загрязнение – наличие или распространение радиоактивных веществ сверх их естественного содержания в окружающей среде, на поверхности материалов или в объемах жидкостей, в теле человека и других объектах.

Радиометр – прибор для измерения ионизирующих излучений, предназначенный для получения измерительной информации об активности нуклида (нуклидов), плотности потока и о потоке ионизирующих частиц и фотонов.

Схема распада радионуклида – энергетическая диаграмма, содержащая сведения о качественных и количественных характеристиках излучений, последовательности испускания частиц или квантов и последовательных состояний ядер элементов.

Радиохимическая лаборатория – специально оборудованная лаборатория, предназначенная для проведения химических операций с радиоактивными веществами.

Гамма-излучение представляет собой высокоэнергетическое электромагнитное излучение, испускаемое при переходе ядра атома из возбужденного состояния в стабильное или менее возбужденное.

Альфа-излучение – представляет собой поток быстро движущихся, обладающих значительной энергией, положительно заряженных частиц (альфа-частиц).

Бета-излучение – поток электронов или позитронов (β -частиц), испускаемых при бета-распаде радиоактивных изотопов.

1. НОРМАТИВНО-ПРАВОВАЯ БАЗА ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ГАЗАМИ И АЭРОЗОЛЯМИ

Радиоактивные отходы по агрегатному состоянию подразделяются на жидкие, твердые и газообразные. К газообразным радиоактивным отходам (ГРО) относятся не подлежащие использованию газообразные смеси, содержащие радиоактивные газы и (или) аэрозоли, образующиеся при производственных процессах, соответствующие критериям отнесения к радиоактивным отходам [1–2].

Имеется два основных источника газообразных радиоактивных отходов: 1) газы могут активироваться в атомных реакторах и 2) выделяться из радиоактивных растворов на заводах по переработке ядерного горючего. В обоих случаях в газообразные отходы могут попадать радиоактивные газообразные и летучие соединения и тонкие, суспендированные в газе радиоактивные твердые частицы. Единственным практически приемлемым способом удаления газообразных радиоактивных отходов является их рассеивание в атмосфере.

Основной нормативной документацией в области обращения с радиоактивными газоаэрозольными выбросами является Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2612–10. ОСПОРБ–99/2010 (ред. от 16.09.2013) и "Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009)", Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности" (НП–021–15) от 25 июня 2015 года N 244 [3] и Серия учебных курсов МАГАТЭ «Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами» от 2005 года.

Фундаментальные принципы обеспечения безопасности при обращении с радиоактивными отходами и требования, принятые на международном уровне, сформулированы в документах международных организаций МАГАТЭ, Международной комиссии по радиологической защите и др. При обращении с РАО вне зависимости от их происхождения должны быть обеспечены: защита здоровья персонала и населения, защита окружающей природной среды, защита будущих поколений, невозложение необоснованного бремени на будущие поколения, обеспечение безопасности за пределами национальных границ, обращение с РАО в рамках национальной правовой структуры, контроль генерации радиоактивных отходов, взаимосвязь между генерацией и последующими этапами обращения с РАО, безопасность установок для обращения с РАО на протяжении всего срока их службы и др. [4].

К ГРО относятся не подлежащие дальнейшему использованию газообразные среды, содержащие тритий и (или) ^{14}C , радионуклиды в виде аэрозолей и (или) инертных радиоактивных газов и (или)

молекулярного йода, его органических или неорганических соединений, в количествах, превышающих предельные значения объемной активности, установленные нормативными правовыми актами [3].

При обращении с ГРО необходимо обеспечить: исключение облучения работников (персонала) и населения от радиационного воздействия ГРО сверх установленных нормами радиационной безопасности пределов; сведение к разумно достижимому низкому уровню облучения работников (персонала) и населения с учетом требований санитарных правил и нормативов обеспечения радиационной безопасности; предотвращение выброса радиоактивных веществ в окружающую среду в количествах, превышающих нормативы предельно допустимых выбросов, установленные в соответствии с нормативными правовыми актами; предотвращение аварий и ослабление их последствий в случае их возникновения.

1.1. Обращение с газообразными радиоактивными отходами

Отходы, содержащие техногенные радионуклиды, относятся к радиоактивным отходам, если сумма отношений удельных активностей (для газообразных отходов сумма отношений объемных активностей) техногенных радионуклидов в отходах к их предельным значениям, приведенным в Приложении 5, превышает 1 [1].

При невозможности определения суммы отношений удельных активностей радионуклидов в отходах к их предельным значениям, приведенным в Приложении 5, отходы, содержащие техногенные радионуклиды, относятся к радиоактивным, если удельная активность радионуклидов в отходах превышает:

– для твердых отходов:

1 Бк/г – для альфа-излучающих радионуклидов,

100 Бк/г – для бета-излучающих радионуклидов;

– для жидких отходов:

0,05 Бк/г – для альфа-излучающих радионуклидов,

0,5 Бк/г – для бета-излучающих радионуклидов.

Ограничение поступления радионуклидов в рабочие помещения и окружающую среду должно обеспечиваться использованием системы статических (оборудование, стены и перекрытия помещений) и динамических (вентиляция и пылегазоочистка) барьеров.

Радионуклиды, при хранении которых возможно выделение радиоактивных газов, паров или аэрозолей, должны храниться в вытяжных шкафах, боксах, камерах, с очистными фильтрами на вентиляционных системах, в закрытых сосудах, выполненных из несгораемых материалов, с отводом образующихся газов.

Хранилище должно быть оборудовано круглосуточно работающей вытяжной вентиляцией.

1.2. Значения допустимых уровней радиационного воздействия

Для каждой категории облучаемых лиц значение допустимого уровня радиационного воздействия для данного пути облучения определено таким образом, чтобы при таком уровне воздействия только одного данного фактора облучения в течение года величина дозы равнялась величине соответствующего годового предела (усредненного за пять лет).

В таблицах и приложениях запись вида $1,6-12$ означает $1,6 \cdot 10^{-12}$, а $1,6+12-1,6 \cdot 10^{+12}$.

Значения допустимых уровней для всех путей облучения определены для стандартных условий, которые характеризуются следующими параметрами:

- объемом вдыхаемого воздуха V , с которым радионуклид поступает в организм на протяжении календарного года;
- временем облучения t в течение календарного года;
- массой питьевой воды M , с которой радионуклид поступает в организм на протяжении календарного года;
- геометрией внешнего облучения потоками ионизирующего излучения.

Для персонала установлены следующие значения стандартных параметров: $V_{\text{перс}} = 2,4 \cdot 10^3$ куб. м в год; $t_{\text{перс}} = 1700$ ч в год; $M_{\text{перс}} = 0$.

Для населения установлены следующие значения стандартных параметров: $t_{\text{нас}} = 8800$ ч в год; $M_{\text{нас}} = 730$ кг в год для взрослых. Годовой объем вдыхаемого воздуха установлен в зависимости от возраста:

Таблица 1.1 – Годовой объем вдыхаемого воздуха для разных возрастных групп населения [1]

Возраст, лет	до 1	2	2–7	7–12	12–17	Взрослые (больше 17)
V , тыс.куб.м в год	1,0	1,9	3,2	5,2	7,3	8,1

Для целей нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных аэрозолей их химические соединения разделены на три типа в зависимости от скорости перехода радионуклида из легких в кровь:

- тип "М" (медленно растворимые соединения): при растворении в легких веществах, отнесенных к этому типу, наблюдается компонента активности радионуклида, поступающая в кровь со скоростью $0,0001 \text{ сут}^{-1}$;

– тип "П" (соединения, растворимые с промежуточной скоростью): при растворении в легких веществах, отнесенный к этому типу, основная активность радионуклида поступает в кровь со скоростью $0,005 \text{ сут}^{-1}$;

– тип "Б" (быстро растворимые соединения): при растворении в легких веществах, отнесенных к этому типу, основная активность радионуклида поступает в кровь со скоростью 100 сут^{-1} .

Для целей нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных газов выделены типы "Г" (Г1–Г3) газов и паров соединений некоторых элементов.

Распределение соединений элементов по типам при ингаляции в производственных условиях приведено в Приложении 6.

Приведенные в приложениях 7 и 8 значения дозовых коэффициентов, а также величины пределов годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА) и удельные активности (ДУА) для воздуха рассчитаны для аэрозолей с логарифмически нормальным распределением частиц по активности при медианном по активности аэродинамическом диаметре 1 мкм и стандартном геометрическом отклонении, равном 2,5. В расчетах использована модель органов дыхания, рекомендованная Публикацией 66 МКРЗ [1].

2. РАДИОМЕТРИЯ ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ

2.1. Общее понятие, принципиальная схема работы ядерного реактора и основные характеристики

2.1.1. Схема построения ВВЭР

Ядерный реактор представляет собой такое устройство, в котором осуществляется управляемая цепная реакция деления ядер. Кинетическая энергия продуктов деления преобразуется в тепло, которое передается охлаждающей среде для последующего использования.

В России на некоторых атомных станциях установлены реакторы – типа ВВЭР 440 и ВВЭР1000. Ниже рассмотрены принципиальные схемы АЭС с реакторными установками данного типа.

Активная зона реактора ВВЭР размещена в цилиндрическом корпусе, изготовленном из высокопрочной стали, и собрана из шестигранных тепловыделяющих сборок (ТВС).

Оболочки твэлов изготовлены из циркониевого сплава. В активной зоне реактора типа ВВЭР-440 установлено 349 ТВС, из них 312 с топливом, остальные – подвижные органы управления.

В каждой рабочей ТВС находится 126 твэлов стержневого типа с сердечником из спеченной в виде таблеток двуокиси урана, обогащенной изотопом U-235 [5].

Замена ТВС производится на остановленном реакторе. Обычно перегрузка выполняется один раз в год в весенне–летний сезон, когда нагрузка энергосистемы минимальна. Ежегодно перегружается одна треть топлива активной зоны. Следовательно, топливо в активной зоне находится в общей сложности три года. Извлечение отработанного топлива из реактора производится под водой специальной перегрузочной машиной с дистанционным управлением.

В АЭС этого типа имеется два контура теплосъема. Первый контур включает в себя реактор, шесть циркуляционных петель у реакторов типа ВВЭР-440, четыре циркуляционных петли у реактора типа ВВЭР-1000, по которым циркулирует теплоноситель – вода. Каждая петля имеет главный циркуляционный насос (ГЦН) и парогенератор (ПГ).

Через входные патрубки реактора вода проходит снизу вверх через активную зону, охлаждая ТВС с твэлами, и через выходные патрубки подается в парогенераторы.

Второй контур включает шесть парогенераторов, два турбогенератора, трубопроводы пара и питательной воды.

Реактор ВВЭР-1000 (В-320) представляет собой следующее поколение легководных реакторов большой мощности [5]. Электрическая мощность

энергоблоков составляет 1000 МВт. Реактор состоит из корпуса, верхнего блока, внутрикорпусных устройств и активной зоны.

Корпус с верхним блоком представляет собой сосуд под давлением с размещенным в нем внутрикорпусными устройствами и активной зоной. Активную зону реактора охлаждают четыре петли с теплоносителем.

Реакторная установка В-320 с реактором ВВЭР-1000 является составной частью энергоблока АЭС и совместно с турбогенератором используется для производства электроэнергии в базовом режиме. Назначение реакторной установки – выработка сухого насыщенного пара для турбогенераторной установки, где тепловая энергия пара преобразуется в электрическую энергию.

Реакторная установка В-320 оснащена модернизированным серийным ядерным реактором ВВЭР-1000 корпусного типа с водой под давлением.



Рис. 2.1. Корпус реактора

Реактор энергетический ВВЭР-1000 предназначен для выработки тепловой энергии за счет цепной реакции деления атомных ядер [5]. Реактор водо-водяной, гетерогенный, корпусного типа, работающий на тепловых нейтронах с водо-водяным теплоносителем-замедлителем (вода под давлением).

Реактор представляет собой вертикальный цилиндрический корпус с эллиптическим днищем, внутри которого размещается активная зона и внутрикорпусные устройства. Сверху реактор герметично закрыт крышкой с установленными на ней приводами механизмов и органов регулирования и защиты реактора и патрубками для вывода кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Крепление крышки к корпусу осуществляется шпильками.

В верхней части корпуса имеются патрубки для подвода и отвода теплоносителя (по два патрубка на петлю), расположенные в два ряда, а также патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура. Применение в конструкции реактора ВВЭР-1000 корпуса с двухрядным расположением патрубков позволяет уменьшить габариты корпуса по патрубкам в плане по сравнению с однорядным, а также упрощает схему циркуляции теплоносителя в реакторе за счет разделения потока теплоносителя сплошной кольцевой перегородкой.

Принудительная циркуляция теплоносителя осуществляется по четырем замкнутым петлям 1-го контура за счет работы главных циркуляционных насосов (ГЦН). Вода 1-го контура, охлажденная в парогенераторах, поступает в реактор через нижний ряд напорных патрубков, проходит вниз по кольцевому зазору между корпусом и шахтой внутрикорпусной, затем через перфорированное эллиптическое днище и опорные трубы шахты входит в ТВС. Из ТВС через перфорированную нижнюю плиту БЗТ теплоноситель выходит в межтрубное пространство БЗТ, в кольцевой зазор между шахтой и корпусом и через четыре верхних выходных патрубка корпуса выходит из реактора.

Нагрев воды осуществляется в активной зоне за счет тепловыделения топливных элементов (ТВЭЛ). ТВЭЛы заполнены слабообогащенной двуокисью урана-235. В настоящее время на всех АЭС с ВВЭР-1000 реализован трехлетний топливный цикл, т.е. каждая ТВС используется в реакторе в течение четырех кампаний [6].

Регулирование реактивности и, тем самым, тепловыделения, осуществляется перемещением органов регулирования с твердым поглотителем, а также изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе.

Реактор устанавливается в бетонной шахте, обеспечивающей надежное крепление реактора и биологическую защиту. Конструкция реактора и способ его закрепления, а также системы управления и защиты (СУЗ) и аварийного охлаждения зоны (САОЗ) обеспечивают безопасную остановку и расхолаживание, в том числе при максимальном расчетном землетрясении 9 баллов по шкале MSK-64, а также обеспечивают прочность конструкции при одновременном воздействии нагрузок, вызванных максимальным расчетным землетрясением и разрывом трубопровода Ду 850 по полному сечению.

Срок службы оборудования реактора – 30 лет. Расчетный срок службы корпуса и крышки реактора – 40 лет.

Основными частями реактора на тепловых нейтронах являются:

- активная зона, состоящая из ТВЭЛов и замедлителя;
- устройства, регулирующие мощность реактора;
- отражатель нейтронов, вылетающих из активной зоны;
- система трубопроводов, предназначенная для отвода тепла от активной зоны реактора и заполненная теплоносителем;
- биологическая защита от излучений.

Схема атомного реактора представлена на рис. 2.2 [7], в состав которой 4 петли 1-го контура. В каждой петле контура имеется парогенератор (SG-1, SG-2, SG-3, SG-4) и циркуляционный насос (CP-1, CP-2, CP-3, CP-4), реактор (NR) и компенсатор объема (P).

Общая схема атомной станции показана на рис. 2.3.

Работающий реактор, как и остановленный, является потенциально опасным радиационным источником внешнего и внутреннего облучения. Рассмотрим кратко виды излучений, возникающих в реакторе и процессы, вызываемые этими излучениями.

Активная зона работающего реактора является в основном источником нейтронного и γ -излучения.

Нейтроны в активной зоне реактора образуются при делении ядер топлива (мгновенные нейтроны) и испускаются сильно возбужденными ядрами продуктов деления (запаздывающие нейтроны).

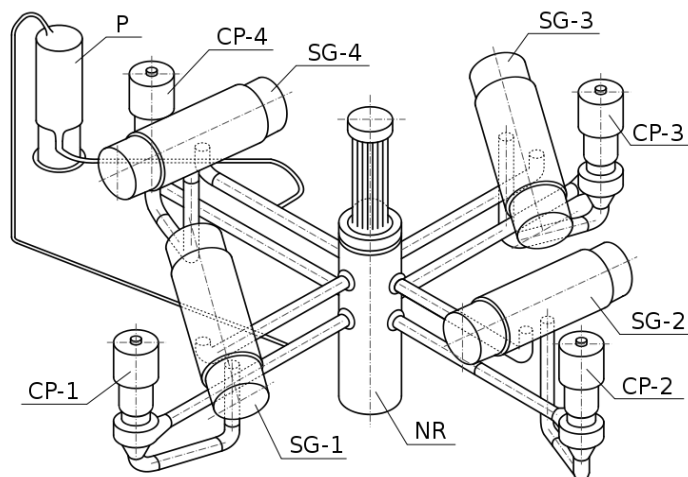


Рис.2.2. 4 петли 1-го контура реакторной установки со своими парогенераторами и циркуляционными насосами

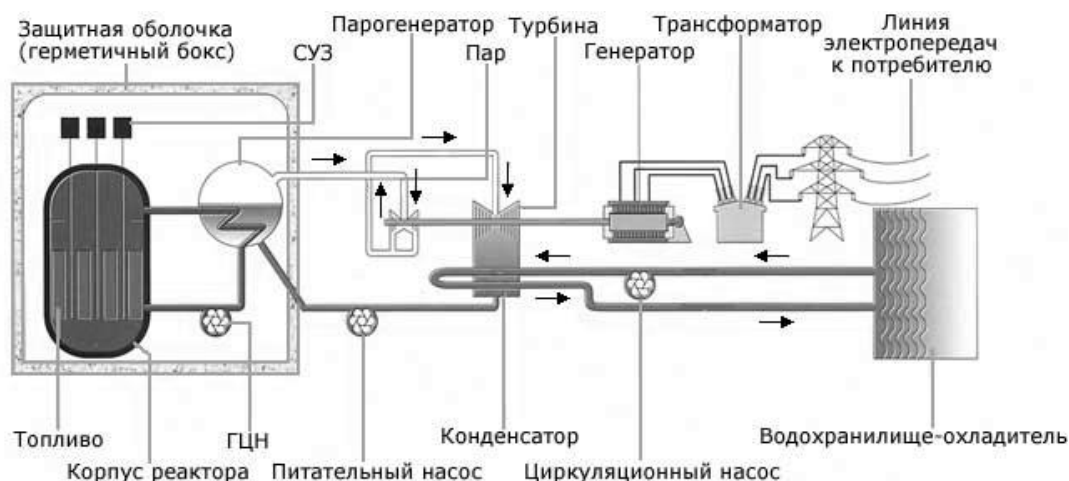


Рис. 2.3. Схема атомной станции

Мгновенные нейтроны (иногда их называют нейтронами деления) образуются практически одновременно с делением ядер урана или плутония, причем их среднее число несколько различно при делении ^{235}U , ^{233}U и ^{239}Pu : $2,5 \pm 0,03$; $2,47 \pm 0,03$ и $2,9 \pm 0,04$ соответственно.

Нейтроны в реакторе по происхождению можно подразделить на четыре группы:

- мгновенные нейтроны, сопровождающие процесс деления ядер топлива;
- запаздывающие нейтроны, испускающиеся возбужденными ядрами осколков деления;
- нейтроны активации, испускающиеся при радиоактивном распаде продуктов некоторых ядерных реакций;
- фотонейтроны, образующиеся в результате (γ, n) -реакций на некоторых ядрах.

С точки зрения радиационной безопасности основным источником является первый – мгновенные нейтроны.

Запаздывающие нейтроны образуются в количестве, существенно меньшем ($0,007 \pm 0,002$ нейтр/дел), и испускаются продуктами деления с периодами полураспада $0,18 \div 54,5$ с.

Наиболее вероятная энергия нейтронов деления $0,6 \pm 0,8$ МэВ, средняя 2 МэА, а максимальная – 18 МэВ.

В результате взаимодействия нейтронов, образовавшихся при делении с ядрами элементов материалов активной зоны реактора, спектр нейтронов изменяет свой вид в области энергий быстрых нейтронов, но совпадает со спектром нейтронов деления в промежуточной области энергий – это спектр замедляющихся нейтронов, т.е. $1/E$ -спектр; в тепловой и надтепловой области энергий – спектр Максвелла, который не имеет строго определенных энергетических границ и является промежуточной, т.е. находящейся на стыке группы тепловых нейтронов с группой промежуточных.

Гамма-излучение в активной зоне работающего реактора образуется также при делении ядер урана или плутония (мгновенное γ -излучение), при распаде короткоживущих продуктов деления и при захвате нейтронов ядрами элементов активной зоны, т.е. в результате (n, γ) -реакций (захватное γ -излучение).

Под продуктами деления понимают, как ядра элементов, образовавшихся при делении, так и их дочерние, внучатые и т.д. ядра.

Продукты деления с периодом полураспада не более 10 мин называют короткоживущими, они и характеризуют активную зону и уровень γ -излучения. Образующие гамма-кванты при других процессах, при работе реактора на мощности, можно не учитывать.

Полное количество энергии, выделяющееся при делении в виде γ -излучения, составляет $7,2 \dots 7,5$ МэВ, и оно испускается в виде одного или нескольких γ -квантов с экспоненциальным энергетическим распределением.

Захватное γ -излучение – это излучение, сопровождающее захват нейтрона ядром элемента любого из материалов активной зоны (топливо, теплоноситель, конструкционные материалы).

Происхождение γ -квантов в работающем реакторе достаточно разнообразнее и представляет собой:

1. Мгновенное γ -излучение деления, которое сопровождает процесс деления за время, меньшее 1 мксек.

–полная энергия мгновенного γ -излучения деления ^{235}U равна 7,5 МэВ;

–средняя энергия γ -квантов – 0,9 МэВ;

–среднее число γ -квантов – 8,3 шт. на один акт деления.

2. γ -излучение короткоживущих продуктов деления – большая часть γ -излучения испускается из продуктов деления в первые 10 мин после деления. Энергетический спектр γ -излучения от короткоживущих источников подобен спектру мгновенного γ -излучения.

3. γ -излучение долгоживущих продуктов деления – испускается при радиоактивном распаде за время, большее чем 10 мин после процесса деления, и состоит главным образом из γ -квантов с малой энергией. Из них около 88 % имеют энергию меньше 1,8 МэВ; максимальная энергия – 2,8 МэВ.

4. Захватное γ -излучение – сопровождающее радиационный захват нейтрона (реакции вида (n, γ)). Полная энергия, испускаемая в виде γ -квантов при радиационном захвате нейтрона, складывается из энергии связи нейтрона и некоторой доли кинетической энергии нейтрона, захваченного ядром.

5. γ -излучение при неупругом рассеянии нейтронов – испускается в процессе прохождения быстрых нейтронов через вещество. В процессе неупругого рассеяния нейтрон передает часть своей энергии ядру и переводит его в возбужденное состояние. В течение очень короткого времени ($\sim 10^{-14}$ сек) ядро теряет свою энергию возбуждения путем испускания одного или нескольких λ -квантов. Если энергия нейтрона больше энергии нескольких возбужденных уровней, переход в основное состояние часто происходит путем каскадного процесса. При этом энергия одного γ -кванта не равна энергии, потерянной нейтроном.

6. γ -излучение продуктов реакций – сопровождает испускание заряженных частиц ядрами, поглотившими нейтроны. В качестве примера может служить реакция (n, γ) на ^{10}B , содержащемся в естественном боре в количестве 19,8 % и широко применяемом в качестве поглотителя нейтронов при регулировании реакторов ВВЭР.

7. γ -излучение продуктов активации – испускается из продуктов радиоактивного распада различных ядерных реакций. При работе реактора на мощности обычно в качестве источника γ -излучения рассматривают нуклид ^{16}N , который образуется из ^{16}O . Реакция $^{16}\text{O} (n, p) ^{16}\text{N}$ идет только на быстрых нейтронах с порогом около 11 МэВ (содержание ^{16}O в естественной смеси изотопов кислорода равно 99,759 %). Радиоактивный изотоп азота ^{16}N имеет период полураспада $T_{1/2} = 7,4$ сек. Примерно 75 % всех γ -распадов сопровождается испусканием γ -квантов с энергией 6,13 МэВ; в 7 % случаев распада испускаются γ -кванты с энергией 7,1 МэВ, а в остальных случаях только β -частицы.

8. Аннигиляционное γ -излучение – образуется при аннигиляции позитронов, испускаемых радиоактивными продуктами ядерных реакции, с электронами. При этом возникают два γ -кванта с минимальной энергией 0,511 МэВ каждый. Аннигиляционное излучение возникает также в результате взаимодействия γ -квантов с веществом, однако этот процесс должен рассматриваться не как источник излучения, а как процесс ослабления γ -квантов.

9. Тормозное γ -излучение – образуется в результате торможения электронов (например, β -частиц радиоактивного распада) в электрическом поле атомов. Процесс аналогичен наблюдаемому в обычной рентгеновской трубке. Электроны, образующиеся в результате взаимодействия возникающих γ -квантов с веществом, также могут создать γ -кванты при торможении. Подобно аннигиляционному излучению, такой каскадный механизм должен рассматриваться только в связи с процессом ослабления γ -квантов.

С точки зрения радиационной безопасности основными источниками являются:

- мгновенное γ -излучение;
- γ -излучение короткоживущих продуктов деления;
- захватное γ -излучение.

Плотность потока нейтронов в активной зоне при работе реакторов современных АС достигает $10^{13} - 10^{14}$ нейтрон/(см² · с). Под их воздействием происходит активация оборудования и деталей внутри реактора, продуктов коррозии, содержащихся в теплоносителе, газов и биологической защиты, окружающих корпус реактора и т.д.

Наиболее высокой наведенной активностью обладают устройства и материалы, находящиеся непосредственно в работающем реакторе (ВКУ, приводы СУЗ, образцы-свидетели и т.д.). Радиоактивное излучение от них может превышать допустимые уровни в сотни и тысячи раз.

Активность продуктов деления по своей величине является наиболее высокой, поэтому все операции с ядерным топливом, заключенным в твэлы выполняются дистанционно. Наибольшую опасность представляют твэлы с поврежденной оболочкой.

В отсутствии защиты мощность дозы гамма-излучения вблизи реактора может составить несколько зивертов (сотни бэр) в секунду.

Теплоноситель и присутствующие или поступающие в него при работе АС примеси, становятся радиоактивными, так как на ядрах вещества теплоносителя и примесей могут происходить реакции (n, γ) -, (n, p) -, (n, β) -реакции. Поэтому теплоноситель является источником γ -излучения (β -частицы, образующиеся при распаде активных ядер, не выходят за пределы оборудования, по которому циркулирует теплоноситель). При нарушении герметичности оболочек твэлов в теплоноситель могут поступать продукты деления, что является дополнительным источником β -излучения теплоносителя.

В результате процессов массообмена часть активных продуктов теплоносителя осаждается на стенках оборудования. Образуется, как говорят, пленка активных отложений. По этой причине источником γ -излучения становится оборудование технологического контура АС.

Для предотвращения перегрева топлива в случае обезвоживания активной зоны смонтирована система, позволяющая быстро залить активную зону водным раствором борной кислоты. При этом не только охлаждаемая сама активная зона, но в результате попадания бора прекращается цепная реакция.

Трубка твэл изготовлена из циркония, легированного 1 % ниобия (сплав 1Н). Наружный $\varnothing$ $9,1 \pm 0,05$ м, толщина $0,65 \pm 0,03$ мм, внутренний $\varnothing$ $7,72 \pm 0,08$ мм, высота таблетки 20 мм, $\varnothing$ $7,53 - 0,05$, с отверстием $\varnothing$ 2,3 мм. Длина твэл 3837 мм, столб таблеток 3530 мм. Полость твэл после заполнения таблеток перед запайкой заполняются гелием 20 – 25 атм. Объем твэл 181 см^3 , 70 % его заполнены таблетками, вес твэл 2,1 кг. В этих реакторах применяются безчехловые ТВС, состоящие из пучка твэл, головки и хвостовика. Твэлы находятся друг от друга 3,65 мм, с шагом размещения твэл 12,75 мм. Min допустимый проход для воды между соседними твэлами 0,8 мм. Масса ТВС 756 кг, объем ее конструкции 80 л. Размер ТВС длина – 4570 ± 1 мм, расстояние между противоположными гранями ТВС 234 мм. Активная зона состоит из 163 ТВС шестигранной формы с 312 твэлами в каждой ТВС. В 61 ТВС установлены органы регулирования реактора, каждый состоит из 18 поглощающих элементов [5]. Радиоактивность одной свежей ТВС составляет 0,5 кюри, гамма-излучение на поверхности около 0,2 бэр/час. В табл. 2.1 приведены основные характеристики АЭС.

Таблица 2.1 – Основные характеристики АЭС

Параметр	Тип реактора	
	ВВЭР-440	ВВЭР-1000
1	2	3
Мощность (эл.), МВт	440	1000
1	2	3
Мощность (тепл.), МВт	1375	3999
Схем, число петель	петлевая, 6	петлевая, 4
Размер активной зоны:		
H, м	2,46	3,58
D, м	2,88	3,10
Глубина выгорания топлив, МВт·сут/кг ^{235}U	30	40
Плотность тепловыделения, кВт/л	86	111
Температура теплоносителя в активной зоне, К, вход/выход	541/569	561/590
Давление в 1 контуре (перед турбиной), МПа	12,5	16
Обогащение ^{235}U , %	3,5	3,3–4,4

Реактор устанавливается в бетонной шахте, которая служит биологической защитой. Реактор ВВЭР-1000 снабжен прочно-плотной защитной оболочкой.

Реакторы типа ВВЭР-440 по советским проектам построены в Венгрии, Чехии, Болгарии, Финляндии, Германии и Украине, а ВВЭР-1000 – Болгарии, Украине и Словакии.

2.1.2 Процессы, протекающие в теплоносителе

Источником радиоактивных благородных газов (РБГ) и радиоактивных аэрозолей (РАЗ) на АЭС является ядерная энергетическая установка. Особую опасность представляют АЭУ работающие в аварийных режимах, связанные с нарушением герметичности оболочек твэл и приводящими к выходу РВ в воздух. К этим неисправностям можно отнести:

- нарушение герметичности оболочек твэл;
- течь 1 контура во II;
- течь 1 контура в III;
- течь 1 контура в необитаемые помещения реакторного отсека.

Основными газообразными продуктами деления, образующимися при работе АЭУ являются [8]:

- инертные газы: Kr – 85, 87, 88, 89; Xe – 133, 135, 138;
- радионуклиды йода: I – 131, 132, 133, 134, 135 и др.

При работе АЭУ в течение 10 суток в твэлах АЭУ содержится: Kr – 28,2 %; Xe – 38,8 %; I – 33 %. Основные характеристики радиоизотопов приведены в Приложении 1.

Загрязнение воздуха РБГ и РАЗ предполагает не только внешнее, но и внутреннее облучение организма, за счет попадания радиоактивных веществ внутрь организма через органы дыхания и во время приема пищи.

В современных энергетических реакторах в основном используется окисное топливо. Происходящие в нем процессы, в частности выход продуктов деления, во многом определяются условиями работы твэлов, характером поведения окиси при облучении. Ниже рассмотрены главные особенности поведения окиси урана под облучением, которые практически не зависят от типа реактора, и общее представление о конструкции твэла.

Геометрические размеры и форма твэлов могут быть различны, их выбор зависит от физических и технических характеристик реактора. Однако на большинстве энергетических реакторов используют твэлы стерженькового типа с зазором между сердечником и оболочкой.

Сердечник, набранный из таблеток спеченной окиси урана, и сквозное отверстие по оси исключает зону с максимальной температурой, уменьшает вероятность расплавления топлива в процессе работы и общее линейное удлинение таблеток при нагреве. В верхней части твэлов предусматривают свободное пространство для компенсации температурного расширения столба таблеток и накопления газообразных продуктов деления, которые накапливаются также в полости центрального отверстия и в зазоре между таблетками и оболочкой.

Под действием высокой температуры, механических нагрузок и мощных потоков ионизирующего излучения в сердечнике твэла наблюдаются изменения, влияющие на выход газообразных продуктов деления. Происходит формирование зон столбчатых кристаллов и равноосных зерен. Из-за низкого коэффициента теплопроводности UO_2 в сердечнике твэла имеет место большой температурный градиент до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ на мм.

В результате массопереноса диаметр исходного центрального отверстия возрастает. Большие температурные градиенты и термические напряжения при работе реактора и при остановках – пусках приводят к тому, что сердечник твэла растрескивается. Образуются радиальные и кольцевые трещины.

При работе на мощности происходит залечивание трещин в результате процесса испарение – конденсация UO_2 . После нескольких таких циклов из-за распухания сердечника происходит уменьшение зазора между топливом и оболочкой.

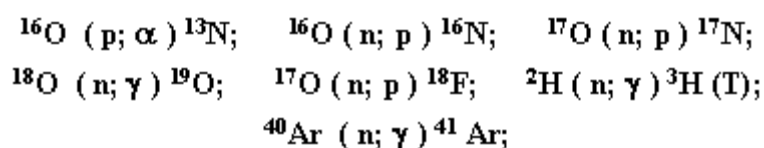
Процессы, происходящие в сердечнике твэла, сложны в связи с физическими воздействиями на оболочку твэла при различных переменных параметрах (температуры, давления, различных видов излучений, химических воздействий всего комплекса элементов сплавов металлических конструкций).

В связи со способностью UO_2 удерживать продукты деления в решетке, их выделение с поверхностей происходит со скоростью, зависящей от изменения температуры и открытой поверхности топлива. При низких температурах газообразные продукты деления вносят определенной вклад в твердое распухание. При температурах, когда начинается диффузия, они концентрируются в дефектах структуры топливной композиции и на границах зерен топлива, образуя пузыри. Рост пузырей вызывают газовое распухание топливной композиции. Часть газообразных продуктов деления выходит из топливной композиции, оказывая механическое воздействие на оболочку твэла.

Процесс газовой выделения и связанное с этим формирование структуры сердечника твэла при работе реактора показал, что скорость нарастания давления в твэлах и скачкообразное изменение давления при очередном запуске реактора после останова связаны с соотношением площадей структурных зон в твэлах. С увеличением площади зон равноосных зерен и расплавленной UO_2 быстрее растет давление при работе реактора под оболочкой твэла. Уменьшить выход газообразных продуктов деления при диффузии из зерен UO_2 возможно при захвате их дефектами кристаллической структуры, возникающими при облучении, которые действуют как ловушки. Диффузионный механизм действует на протяжении всего времени работы твэла до выгорания, при котором исходная структура UO_2 в этой зоне сердечника исчезает.

Образование новых изотопов. При взаимодействии ионизирующего излучения с теплоносителем и находящимися в нем примесями образуются радиоактивные нуклиды, служащие дополнительным источником активности, что приводит к повышенной радиоактивности самого теплоносителя. Условно различают газовую, осколочную активность теплоносителя, а также активность примесей в теплоносителе.

Газовая активность водного теплоносителя вызывается образованием радиоактивных нуклидов по следующим реакциям [8]:



Радиационные характеристики продуктов деления представлены в Приложении 2. Наибольшую опасность из новообразованных нуклидов представляет изотоп азота ^{16}N .

Тритий в природе может существовать в газообразном виде и в окисленных формах НТО, T_2O , а может входить и в состав более сложных органических и неорганических соединений. Т.к. он сравнительно быстро окисляется, то его газообразная форма неустойчива. На АЭС с ВВЭР в теплоносителе тритий существует в основном в виде тритиевой воды, в

продувочном газе – в газообразной и окисленной формах. В реакторе тритий образуется в результате тройного деления ядерного топлива при нейтронной активации Li и B, растворенных в теплоносителе первого контура, а также активации дейтерия, содержащегося в теплоносителе в качестве примеси (до 0,015 %). В теплоносителе реактора ВВЭР образование трития происходит по реакции $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ (в теплоноситель бор добавляется в виде борной кислоты – при регулировании реактивности реактора с помощью раствора борной кислот) и $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ (литий попадает в виде примеси к гидроокиси калия – при использовании гидроокиси лития для поддержания щелочной реакции теплоносителя и нейтрализации борной кислоты), а также выход трития за счет диффузии и из негерметичных твэлов.

В АЭС с реакторами типа ВВЭР за счет тройного деления в твэлах образуется около 0,37...0,74 ТБк/[МВт (эл.) –год] трития.

Для реакторов типа ВВЭР переход ^3H в жидкие и газообразные отходы принимают равным 74 и 7,4.

Через оболочку из циркониевого сплава в теплоноситель вследствие диффузии поступает примерно 0,1 % трития, находящегося под оболочкой. Если оболочка твэла сделана из нержавеющей стали, то скорость поступления трития в теплоноситель приблизительно в 10 раз больше.

Активация примесей вносит существенный вклад в радиоактивность теплоносителя и происходит это из-за наличия естественных примесей: растворенных в теплоносителе солях натрия, кальция, магния и др.

В результате активации образуются газы (^{41}Ar , ^{14}C , $^{13,16}\text{N}$). ^{41}Ar образуется при захвате нейтрона ядром ^{40}Ar . Мощность выброса ^{41}Ar в атмосферу на ядерных реакторах зависит от их конструктивных и технологических особенностей.

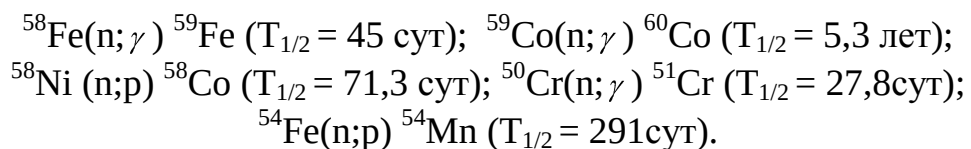
До 70 % в газообразных отходах составляет ^{133}Xe с $T_{1/2} = 5,27$ сут, $E_\beta = 0,346$ Мэв, и $E_\gamma = 0,081$ Мэв (37 %). Одним из нуклидов, вносящих существенный вклад в радиоактивность примесей, является ^{24}Na с периодом полураспада 15 ч, излучающий жесткие гамма-кванты. Образуется этот нуклид по реакциям: $^{23}\text{Na}(n; \gamma)^{24}\text{Na}$; $^{24}\text{Mg}(n; p)^{24}\text{Na}$; $^{27}\text{Al}(n; \alpha)^{24}\text{Na}$.

В связи с такого рода активацией примесей водный теплоноситель первого заполнения, так же, как и подпиточная вода, должны быть не только умягчены, но и деионизированы.

Введенные для разных целей в первый контур вещества также могут активироваться. Так, на АЭС бывшего СССР получило распространение добавление в теплоноситель едкого кали при регулировании реактивности реактора, что приводит к образованию радиоактивного нуклида ^{42}K с периодом полураспада 12,4 ч по реакции: $^{41}\text{K}(n; \gamma)^{42}\text{K}$.

Однако содержание ^{41}K в природной смеси не превышает 6,9 %, поэтому вклад активности ^{42}K в общую активность теплоносителя мал.

Активность теплоносителя вызывается также коррозией активированных материалов активной зоны и активацией продуктов коррозии конструкционных материалов контура в процессе их миграции через активную зону. Ниже приведены основные реакции, по которым происходит активация продуктов коррозии, с периодами полураспадов радионуклидов в скобках (Приложение 3):



Радиоактивные примеси могут осаждаться в различных местах контура и тем самым сильно затруднять обслуживание оборудования.

Осколочная активность теплоносителя является результатом попадания продуктов деления ядерного топлива при работе с поврежденными твэлами. Обычно различают две стадии повреждения твэлов:

1) газовые неплотности, когда в теплоноситель попадают нуклиды благородных газов (криптона и ксенона) и осколки деления, летучие при рабочей температуре твэлов (йод, бром, цезий);

2) повреждения, сопровождающиеся контактом топлива с теплоносителем, что может привести к попаданию в контур нелетучих нуклидов (молибдена, церия и др.), не говоря уже о возможном выносе в контур частиц топлива. Последние, как и примеси в теплоносителе, загрязняют первый контур.

Радионуклиды йода. При реакциях деления, а также при распаде продуктов деления образуется несколько радионуклидов йода. Наибольший вклад в дозу облучения дают нуклиды с массовыми числами 129, 131, 132, 133, 134 и 135. Для всех из них, за исключением ^{129}I , в активной зоне реактора достаточно быстро устанавливается равновесное состояние. Попасть в окружающую среду радионуклиды йода могут только при разгерметизации оболочки твэла и первого контура. Как источник облучения наиболее важным нуклидом йода является ^{131}I . В равновесных условиях его активность колеблется от 0,92 до 1,1 пБк/МВт (тепл.). Долгоживущий ^{129}I не обнаруживают в окружающей среде вокруг АЭС, и его выбросы значительно меньше выбросов других радионуклидов йода.

^{131}I может существовать либо в аэрозольной, либо в газовой форме. Соотношение этих форм зависит от многих факторов и различно для разных АЭС.

Выброс йода из реакторов ВВЭР определяется расходом неорганизованных протечек теплоносителя в технологические помещения

и выходом йода в воздух помещений. Обычно протечки теплоносителя на реакторах РБМК больше, чем на реакторах ВВЭР.

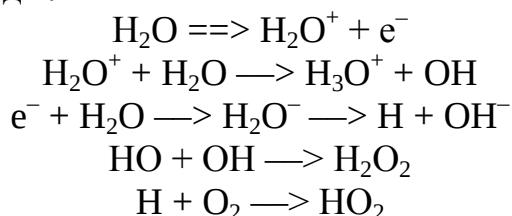
Аэрозоли. Часть продуктов деления, продукты распада ИРГ и нуклиды с наведенной активностью образуют аэрозоли, которые с воздушными выбросами могут поступать во внешнюю среду. Количество таких аэрозолей зависит от типа реактора, его мощности, эффективности систем газоочистки, водоочистки и ограничивающих барьеров, продолжительности эксплуатации и т.п.

В составе аэрозолей, выбрасываемых из АЭС с реактором типа PWR (ВВЭР), идентифицируют несколько десятков радионуклидов. Наиболее типичные из них: ^{131}I , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Sr , ^{103}Ru , ^{134}Cs , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^5Cr , ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{95}Zr , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{22}Ne , ^{24}Na , ^{65}Zn , ^{88}Rb , ^{98}Nb , ^{99}Mo и др [9]. Аэрозоли, образующиеся в результате деления или распада ИРГ, в газовых выбросах АЭС появляются после разгерметизации оболочки твэла. Их доля в общей смеси долгоживущих радионуклидов, как правило, колеблется в широких пределах (10...80 % общей активности) и зависит от состояния активной зоны. Активность отдельных радионуклидов изменяется от нескольких сотых до нескольких единиц гигабеккерелей в год.

Другим источником аэрозолей на реакторах данного типа являются работы, связанные с ремонтом оборудования, загрязненного теплоносителем первого контура.

Радиолиз водного теплоносителя. Это процесс разложения воды под действием ионизирующего излучения. Вследствие специфических условий реакторной установки (высоких температур, дополнительных химических добавок в теплоноситель первого контура) процесс радиолиза может изменяться. Под действием различных видов мощного ионизирующего излучения молекулы воды и растворенные в ней примеси разрушаются, возбуждаются и ионизируются.

При ионизации молекул воды в присутствии кислорода возникают гидратированные электроны, активные радикалы (OH^- и др.), а также молекулы перекиси водорода. Особую роль в живых организмах играют образующиеся под действием ионизирующего излучения достаточно устойчивые супероксидные радикалы HO_2 . Ниже приведены основные реакции радиолиза воды.



Как известно, вода – это самое распространенное соединение в живых организмах. Содержание воды в животных клетках составляет около 70 %. Вода заполняет межклеточные пространства и представляет собой среду, в

которой протекают биохимические реакции, диффундируют вещества, водная среда определяет структуру и взаимодействия биологических макромолекул. Поэтому процессы радиолиза воды играют важнейшую роль при облучении живых организмов. Образующиеся промежуточные радикалы и ионы реагируют с биомолекулами, изменяя их (окисление, замещение функциональных групп, деструкция, сшивка полимеров). Кроме того, возможно и прямое действие излучения на органические молекулы живых организмов. Промежуточные радикалы в присутствии кислорода воздуха могут дать начало цепным реакциям окисления, что во много раз увеличивает количество измененных молекул. Большое значение имеет также миграция энергии возбуждения в молекулах биополимеров. В результате возбуждение молекулы, происшедшее в любом ее месте, может привести к поражению ее активного центра, например, к инаktivации ферментов [10].

Кроме водорода H_2 , кислорода O_2 и перекиси водорода H_2O_2 , при радиолизе воды могут образовываться также H , OH , HO_2 , H_2O , и др. Многие из них обладают окислительными или восстановительными свойствами в зависимости от содержащихся примесей в теплоносителе, температуры, давлений в первом контуре и т.п.

Чтобы уменьшить радиолиз повышают концентрацию водорода в теплоносителе. Это делают путем добавления в теплоноситель гидразина или аммиака. Обычно концентрация водорода поддерживается на уровне 20...50 см/кг. В этом случае кислород, введенный в контур, например, с подпиточным теплоносителем, рекомбинирует с водородом. Радиолиз теплоносителя в таких условиях не является источником кислорода.

Обычно на практике радиолиз водного теплоносителя не вызывает заметных изменений его физико-химических свойств. Возможны проявления вторичных неблагоприятных явлений в результате радиолиза, которые могут привести к следующим факторам и неблагоприятным событиям:

- отрицательному влиянию некоторых продуктов разложения воды на коррозионную стойкость конструкционных материалов;
- возможное образование взрывоопасной смеси кислорода и водорода;
- отрицательное влияние газообразных продуктов разложения на условия теплопередачи и на реактивность реактора.

Бороться с этими неблагоприятными факторами можно, вводя в теплоноситель водород, который при концентрации больше 30 н. мл/кг практически полностью подавляет процессы радиолиза воды. Для поддержания необходимой концентрации водорода, обеспечивающей подавление процессов радиолиза в контур, как правило, вводят аммиак, в результате разложения которого по реакции: $2NH_3 \rightleftharpoons 3H_2 + N_2$ создается необходимая концентрация водорода в водном теплоносителе.

Радиоактивный углерод ^{14}C может образовываться на ядерных реакторах в результате реакций $^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$ (активации азота, находящегося в виде примеси в топливе), а также при тройном делении; $^{17}\text{O}(n, \alpha) ^{14}\text{C}$ (активации кислорода, содержащегося в окисном топливе и в замедлителе) и $^{13}\text{C} (n, \gamma) ^{14}\text{C}$, которые по сравнению с другими являются наиболее практически значимыми. По оценкам скорость образования ^{14}C в реакторах PWR близка к $0,22 \dots 0,9 \text{ ТБк/[ГВт(эл.) –год]}$, в реакторах BWR – $0,55 - 1,1$.

Химические процессы в контуре. Основные химические процессы в контуре связаны главным образом с коррозией конструкционных материалов и появлением отложений на теплопередающих поверхностях. Из наиболее важных видов коррозии реакторных материалов следует упомянуть межкристаллитную коррозию аустенитных нержавеющей сталей, связанную с уменьшением содержания хрома по границам зерен по сравнению с их центрами, а также коррозионное растрескивание под напряжением. С повышением содержания в водном теплоносителе кислорода и хлорид-иона значительно увеличиваются скорости протекания этих коррозионных процессов. В ряде случаев повышенное содержание кислорода может вызвать ускоренную коррозию и циркониевых сплавов, особенно в щелочной среде. Очень важной характеристикой теплоносителя, от которой зависят скорость и вид коррозии, характер коррозионного процесса, количество переходящих в воду продуктов коррозии, их дисперсный состав, является значение pH, характеризующее активность водородных ионов. Наиболее заметно проявляется влияние pH теплоносителя на коррозию сталей перлитного класса и алюминия: с повышением pH до 9–10 можно снизить в несколько раз и скорость коррозии и скорость перехода продуктов коррозии в воду. Однако превышение этих значений может привести в некоторых случаях к щелочному растрескиванию сталей.

Осаждения на теплопередающих поверхностях вызываются также солями жесткости, что особенно важно для кипящих реакторов. Наиболее опасны разного рода отложения на поверхностях ТВЭлов, поскольку приводят к ускорению коррозии их оболочки.

Чтобы снизить вредное влияние описанных процессов, необходимо при эксплуатации ЯЭУ поддерживать концентрации различных примесей в теплоносителе на определенном уровне, что требует значительных усилий, затрачиваемых на очистку теплоносителя.

Все физико-химические процессы, имеющие место в контурах с теплоносителем, должны быть строго учтены при эксплуатации АЭС.

Чтобы избежать попадания в теплоноситель послемотажных загрязнений, а также, чтобы убедиться в высоком качестве монтажных работ, перед началом эксплуатации АЭС, производят подготовку и очистку контуров.

На первом этапе проводятся гидравлические испытания контура, которые заключаются в проверке герметичности контура, заполненного водным теплоносителем, при повышенном давлении.

После гидравлической проверки герметичности контура и прочностных испытаний проводится его циркуляционная промывка, которая наряду с очисткой и отмывкой контура от послемотажных загрязнений обеспечивает создание на внутренних поверхностях контура защитной окисной пленки. Циркуляционную промывку производят последовательно холодным (до 100 °С) и горячим (до 260 °С) теплоносителем. Во время промывки обеспечивается предварительное снятие гидравлических характеристик реактора.

Причины загрязнения теплоносителя. Перечисленные выше явления заставляют предъявлять весьма высокие требования к чистоте теплоносителя. Так как контур замкнут, то, казалось бы, можно ожидать высокую чистоту теплоносителя. Однако это справедливо лишь в отношении естественных примесей воды. Между тем в любом контуре и в любых условиях, как при эксплуатации оборудования, так и при его стоянке протекают коррозионные процессы, в результате которых в теплоноситель переходят окислы конструкционных материалов. Поэтому для водного теплоносителя двухконтурной АЭС наиболее характерно присутствие именно окислов конструкционных материалов с превышением их содержания над естественными примесями.

С течением времени естественные примеси остаются на том же уровне, а содержание продуктов коррозии непрерывно нарастает. Если не будет организовано удаление их из контура, то это может привести к недопустимо высокому их содержанию и осаждению на поверхностях контура. Поэтому в систему КМППЦ должна быть включена установка для очистки воды реактора от продуктов коррозии, позволяющая поддерживать их концентрацию на допустимом уровне. В такую установку направляется часть воды реактора с последующим ее возвратом в первый контур.

Вода реактора проходит непрерывную очистку, чем обеспечивается очистка от продуктов коррозии.

Работа атомной энергетической установки сопровождается весьма существенными физико-химическими процессами, протекающими в ее контурах, так как ядерный реактор является мощным источником ионизирующего излучения и с коррозионным воздействием теплоносителя на конструкционные материалы. К тому же физико-химические процессы протекают в тесной связи с тепловыми процессами, оказывая взаимное влияние друг на друга и для контроля за этим требуется установка дополнительного специфического оборудования.

В результате деления и захвата нейтронов в топливе накапливаются радиоактивные продукты, при этом изменяются состав, физико-

химические и механические свойства топливной композиции. В процессе деления образуется большое количество радиоактивных продуктов, при этом диоксид урана при нормальных рабочих температурах удерживает более 98 % этих продуктов. Около 1...2 % продуктов, в основном газообразные и летучие – криптон, ксенон и йод, диффундируют в газовый объём между топливной композицией и оболочкой. Оболочка твэла обеспечивает его целостность, механическую прочность, препятствует попаданию продуктов деления в 1-й контур. Герметичность оболочек должна сохраняться в течение всего срока работы твэла и последующего хранения отработанного топлива [5].

На АЭС с водным теплоносителем требуется весьма высокая чистота воды первого контура. Примеси, содержащиеся в воде, могут вызвать отложения на элементах первого контура – в реакторе, насосе и арматуре.

Особенно опасны отложения на тепловыделяющих элементах (твэл) реактора, так как это не только приводит к снижению коэффициента теплопередачи, но может вызвать и аварийную ситуацию. Температура оболочки твэлов всегда выше температуры теплоносителя. Превышение это тем больше, чем больше толщина отложений и тепловая нагрузка.

Для реакторных твэлов, тепловая нагрузка неравномерна и достигает $1,2 \cdot 10^6$ – $1,5 \cdot 10^6$ Вт/м², составляя в среднем $0,3 \cdot 10^6$ – $0,5 \cdot 10^6$ Вт/м². Поэтому отложения в реакторе могут вызвать ухудшение теплопередачи, сильный нагрев и как следствие разрушение оболочек твэлов. При разрушении оболочек происходит значительная активация теплоносителя за счет выхода в него продуктов деления. При превышении активности в контуре выше определенного предела необходим останов реактора.

Работа атомной энергетической установки сопровождается протеканием следующих сложных процессов в теплоносителе первого контура:

- радиационные процессы в контуре, приводящие к образованию новых изотопов и радиолизу водного раствора теплоносителя, а также радиолизу и термолизу ионитов;
- химические процессы, связанные с коррозией конструкционных материалов и активацией продуктов коррозии;
- образование дефектных твэл и разгерметизация их, а это приводит к образованию осколочной активности радиоактивных инертных газов;
- активация примесей [5].

Появление микротрещин в оболочках твэлов сопровождается преимущественным выходом в теплоноситель ИРГ. По мере роста микротрещин в теплоноситель начинают поступать летучие продукты деления и в частности радионуклиды йода, цезия, теллура. При крупных трещинах возможен прямой контакт теплоносителя с топливом и его размывание. Этот процесс сопровождается выходом в теплоноситель

продуктов деления, испускающих запаздывающие нейтроны Измеряя активность перечисленных групп радионуклидов, характерных для того или иного вида негерметичности, можно грубо оценить состояние оболочек твэлов в активной зоне. В качестве реперных радионуклидов выбирают из группы ИРГ – ^{88}Kr , из группы летучих радионуклидов ^{132}I , и, наконец, из группы радионуклидов, испускающих запаздывающие нейтроны – ^{87}Br и ^{137}I .

Активность теплоносителя складывается из “собственной”, “осколочной” и коррозионной активности.

“Собственная” (кислородная) активность теплоносителя возникает под действием нейтронного излучения на H_2O по реакциям: $^{16}\text{O}(\text{n},\text{p})^{16}\text{N}$; $^{17}\text{O}(\text{n},\text{p})^{17}\text{N}$; $^{18}\text{O}(\text{n},\gamma)^{19}\text{O}$ и $^2\text{H}(\text{n},\gamma)^3\text{H}$.

Основной вклад в собственную активность даёт реакция $^{16}\text{O}(\text{n},\text{p})^{16}\text{N}$. Изотоп ^{16}N распадается с периодом полураспада 7,35 с. и испусканием высокоэнергетического гамма-излучения с энергией 6,13 МэВ и 7,1 МэВ. В связи с малым периодом полураспада при остановленном реакторе кислородная активность отсутствует.

“Осколочная” активность теплоносителя возникает в результате поверхностной загрязнённости оболочек твэл делящимся материалом и прямого контакта теплоносителя с делящимся материалом при значительном повреждении оболочек. Уровень поверхностной загрязнённости “свежего” топлива по ^{235}U не превышает 10^{-9} г/см², допустимая доля газовой негерметичности оболочек не более 0,01 (1 %) и допустимая доля значительных разрушений не более 0,001 (0,1 %). “Осколочная” активность определяется в основном следующими изотопами: ^{84}Br , ^{85}Br , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{137}I .

Коррозионная активность теплоносителя образуется в результате следующих процессов:

- активации конструкционных материалов активной зоны с последующей их эмиссией в воду (в основном Zr);
- активации примесей в теплоносителе;
- активации плёнки продуктов коррозии конструкционных материалов и их эмиссии в воду (^{60}Co , ^{59}Fe , ^{51}Cr , ^{56}Mn).

Активность отдельных осколочных радионуклидов в теплоносителе зависит от степени разрушения оболочек твэл.

Для определения степени их разрушения нет необходимости в проведении развёрнутого радиохимического анализа, а достаточно определить отношение двух наиболее характерных радионуклидов, схемы распада которых допускают селективную регистрацию на фоне остальных радионуклидов осколочного и коррозионного происхождения. В качестве таких изотопов в средствах радиационного контроля (СРК) выбраны радионуклиды ^{88}Kr и ^{87}Br .

Метод оценки ^{88}Kr в теплоносителе по гамма-излучению позволяет регистрировать начальные стадии появления газовых неплотностей в оболочках ТВЭЛ и следить за динамикой развития их негерметичности. Для оценки активности ^{88}Kr в СРК используется устройство детектирования типа УДЖГ-07 (УДЖГ-12Р1 и ВБ-91), предназначенное для преобразования плотности потока гамма-квантов в диапазоне от $3,52 \cdot 10^{-13}$ до $4,16 \cdot 10^{-13}$ Дж (от 2,2 до 2,6 МэВ) в последовательность статически распределённых импульсов, средняя частота которых пропорциональна объёмной активности ^{88}Kr , растворённого в воде 1-го контура.

В целях определения состояния активной зоны по величине отношения активности реперных радионуклидов СРК предусматривается непрерывное измерение объёмной активности ^{87}Br по запаздывающим нейтронам. Селективное измерение активности ^{87}Br позволяет определять степень разрушения активной зоны в случае приближения повреждений к предельно-допустимому состоянию. Для исключения влияния других радионуклидов и достаточно чистого измерения ^{87}Br необходима задержка доставки теплоносителя к устройству детектирования на время не менее 100 с, но не более 200 с, т.к. активность ^{87}Br быстро падает. В связи с этим, устройство детектирования ^{87}Br по запаздывающим нейтронам устанавливается непосредственно в помещении СВО-1 (пом. А-201) вблизи трубопроводов СВО до охладителя продувки.

Измерение объёмной активности ^{87}Br , имеющего период полураспада 53 с, обеспечивает контроль за усреднённым состоянием активной зоны, т.к. период циркуляции теплоносителя по 1-му контуру составляет 18,5 с, и перемешивание происходит достаточно эффективно [8].

Водный режим реакторов. Для реакторов ВВЭР регулирования реактивности обеспечивается борной кислотой, которая вводится в теплоноситель.

Она химически устойчива в радиационных условиях, хорошо растворима в воде, слабо влияет на коррозионные процессы. Однако в ее присутствии возрастает переход продуктов коррозии в воду, а также рН теплоносителя, что может увеличивать скорость коррозии сталей. Поэтому для нейтрализации борной кислоты в контур вводится щелочь: либо едкое кали (в странах бывшего СССР), либо гидроокись лития (за рубежом). Для поддержания требуемой концентрации водорода, который необходим для подавления процессов радиолиза, в состав теплоносителя добавляют аммиак. Такой водный режим называют смешанным аммиачно-калиевым режимом при борном регулировании, получивший весьма широкое распространение.

Процесс очистки водного теплоносителя на АЭС можно разделить на два этапа:

– первый – приготовление химически обессоленной воды высокой чистоты для первичного заполнения контуров и для последующей их подпитки;

– второй – постоянная очистка теплоносителя, циркулирующего в контуре, а также вод бассейнов выдержки и перегрузки от различных примесей.

Первый этап очистки проводят на так называемых установках химводоочистки (ХВО), а второй – на установках спецводоочистки (СВО) или конденсатоочистки (КО). В ХВО предусматриваются очистка исходной воды от механических примесей в механических фильтрах, удаление свободной кислоты в декарбонизаторах, а также ионная очистка в анионитовых и катионитовых фильтрах. В механическом фильтре, который заполняется, например, дробленным антрацитом, отделяются грубодисперсные загрязнения. Далее вода очищается в несколько приемов на ионообменных фильтрах.

Ионообменная фильтрация в настоящее время – наиболее распространенным методом очистки водного теплоносителя. Он основан на способности некоторых материалов – ионитов, которые сами в воде практически не растворяются, изменять в нужном направлении ионный состав воды. В результате обмена ионами между водой и твердым веществом с ионной связью (ионитом) содержащиеся в воде ионы удерживаются ионитом, который отдает в воду эквивалентное количество ионов того же знака. Для очистки водного теплоносителя ядерных энергетических установок применяют ионообменные материалы, являющиеся сополимерами стирола и дивинилбензола, которые обладают сетчатой структурой – матрицей, содержащей фиксированные ионы. Подвижные противоионы уравнивают заряд фиксированных ионов и способны к обмену.

2.1.3 Контроль состояния защитных барьеров

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.

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.

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

При нормальном и стабильном качестве теплоносителя 1-го контура оперативный контроль за герметичностью оболочек твэл осуществляют по общей удельной радиоактивности теплоносителя. При герметичных оболочках твэл общей удельной активности теплоносителя $10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-5}$ кюри/литр ($3,7 \cdot 10^6 \div 11,1 \cdot 10^5$ Бк/л).

При потере герметичности оболочек у 50 твэл с выходом газообразных осколков деления в теплоноситель его радиоактивность увеличится в 30 – 50 раз. При разгерметизации 1 % твэл (500 шт.) суммарная общей удельной радиоактивности теплоносителя возрастает до 0,1 кюри/литр (в 1000 раз, чем при герметичных оболочках). При нарушении водно-химического режима в 1 контуре возможно увеличение радиоактивности теплоносителя в десятки раз за счет перехода в него продуктов коррозии со стенок труб и твэлов.

Непрерывные измерения динамики активности ПД в комплексе с моделированием процессов выхода ПД из топлива позволят отслеживать и интерпретировать процессы развития повреждений оболочек твэлов при работе на всех режимах реактора.

Сложность отражаемых на мониторах спектров зависит от радиационного состояния активной зоны (поверхностного загрязнения и герметичности тепловыделяющих сборок – ТВС), времени доставки теплоносителя до измерительного участка, наличия активируемых примесей в воде и эффективности очистительных фильтров.

В качестве примера на рис. 3.4 приведен типичный для реактора ВВЭР-1000 гамма-спектр ТПК, полученный на работающем реакторе на номинальной мощности. Измерительный тракт смонтирован на базе детектора из сверхчистого германия ORTEC 43-TP41327B с относительной эффективностью 10 % и спектрометрического блока типа DSPEC jrTM с цифровым сигнальным процессором. Цена канала составляла 0,35 кэВ, энергетическое разрешение – 1,9 кэВ для $E_\gamma = 1332$ кэВ, входная нагрузка тракта не превышала 10^4 и/с. Теплоноситель первого контура доставлялся по байпасной линии системы «АРКТУР», предусмотренной проектом для реакторов типа ВВЭР-1000 [5].

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 аппаратный спектр.

Оценку состояния активной зоны реактора осуществляют по реперным нуклидам. Однако, при поверхностном загрязнении активной зоны делящимися продуктами – последние затрудняют оценить герметичность оболочек твэл, так как активность радионуклидов ПД при этом являются доминирующими в теплоносителе.

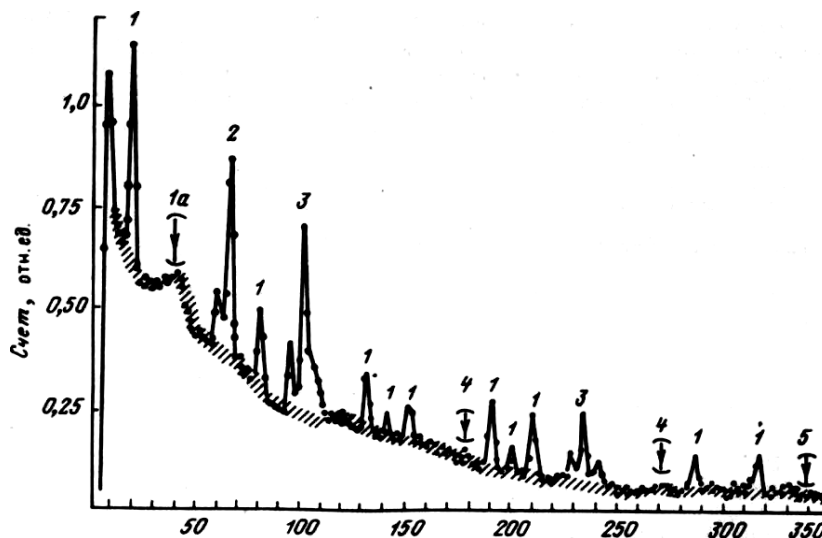


Рис. 2.4. Спектр γ -излучения таблетки механического фильтра при пропускании пробы воды реактора ВВЭР:

- 1 – одиночный пик (синглет); 1a – пик комптоновского распределения; 2 – дуплет с разрешимыми вершинами;
- 3 – триплет; 4 – статически незначимые пики; 5 – полоса доверительной оценки наличия пика (базовая кривая фона)

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 , которые относительно легко идентифицируются в ТПК. Эти цепочки начинаются с короткоживущих инертных радиоактивных газов (ИРГ), и с появлением микротрещин вероятность выхода их из-под оболочки твэлов мала. Указанные нуклиды попадают в теплоноситель в основном при делении в слое поверхностного загрязнения и служат его индикатором. Анализируя результаты измерений активности нелетучих радионуклидов стронция и бария в ТПК, обеспечивается контроль ПЗ делящимися нуклидами, при этом вводятся поправки при оценке количества появляющихся негерметичных твэлов.

В процессе работы ядерного блока возможно нарушение герметичности оболочек ТВЭЛ. Различают два типа таких нарушений: образование микротрещин, через которые могут проникать только газообразные ПД (газовая неплотность), и наличие дефектов, при которых возможен непосредственный контакт горючего с теплоносителем, что приводит к проникновению в него кроме газообразных еще и других осколков деления.

Допустимое количество ТВЭЛов с нарушенной герметичностью контролирует общая удельная активность по реперным нуклидам в ТПК, при этом регламентируется число ТВЭЛов с микродефектами, которое не должно превышать 1 %, а с прямым контактом топлива с водой – 0,1 % общего количества ТВЭЛов.

Оценка герметичности ТВС необходима для информации об утечке ПД из-под оболочки ТВЭЛов, которую получают, измеряя и корректируя активности определенного набора реперных нуклидов в ТПК. В целях упрощения и для надежности расчетов качества выбираются нуклиды, являющиеся летучими или газообразными, и имеют не более одного летучего или газообразного "предшественника". Они обеспечивают надежную идентификацию и относительно легко измеряются в воде, и при этом слабо сорбируются на поверхностях оборудования первого контура.

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 , а также ИРГ ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr и ^{88}Kr .

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

Технические трудности при пробоотборе в течение десятилетий "не позволяли" радионуклидам ИРГ занять надлежащее им место при оценке радиационного состояния активной зоны много раньше. Решение этой проблемы возложено на установку СТПК–01 аттестованной метрологическими органами и ориентированной 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 нижним уровнем ПЗ делящимися нуклидами, а верхнее – допустимыми значениями удельной активности радионуклидов йода.

Необходимость в первостепенности контроля по наличию ИРГ за состоянием ТПК 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 и составляет 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 дочерних продуктов распада, в частности ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{138}Xe и ^{88}Rb , ^{89}Rb , ^{138}Cs .

На некоторых АЭС внедряется радиационный контроль на базе ИРГ. 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. 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 и ^{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 .

Радионуклиды ^{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, которые регистрируются устройством детектирования типа УДИН–02(06), ответственного за КГО твэлов работающего реактора, что и позволяет оценить состояние оболочек твэлов, полученных на основе нейтронных и гамма-спектрометрических измерений.

Состояние АЗ работающего реактора оценивается по её активности регистрируемых реперных нуклидов, что в итоге определяет количество негерметичных твэлов.

При герметичных оболочках твэлов, в начальный период эксплуатации реакторов, основной вклад в общую активность ТПК вносят продукты активности примесей в теплоносителе и конструкционных материалов АЗ реактора такие как: ^{24}Na , ^{42}K , ^{18}F , ^{13}N , ^{41}Ar , ^{122}Sb , ^{124}Sb , ^{187}W , ^{75}Se , ^{18}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 , ^{18}Cl , ^{82}Br и др. с возможностью оценки по ним концентрации стабильных натрия, калия, хлора и др., содержание которых регламентируется нормами водного режима.

Для контроля радионуклидов в выбросах, образующихся вследствие утечки теплоносителя через неплотности ПК, измерение приближено к

месту образования или максимальной концентрации радионуклидов, где их активность высока и легко поддается определению (например, в ТПК, который является основным источником газоаэрозольных выбросов). В точках выбросов контролируются реперные радионуклиды, а соотношение их активностей с активностью остальных нормируемых радионуклидов определяется по данным спектрометрических измерений в ТПК.

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 контролируемые протечки ПК. В качестве базового нуклида максимально отвечает ^{24}Na .

Радиоактивные коррозионные отложения на внутренних поверхностях первого контура вызывают отрицательные 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.

При определении активности взвесей в ТПК 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 . Присутствуют и 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.

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.

В табл. 2.2 показаны основные и дополнительные реперные радионуклиды, способствующие технологическому контролю.

Синхронный рост концентрации ^{131}I и радионуклидов коррозии после останова реактора и во время переходных процессов 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 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 [7].

Свойства радиоактивных газов и аэрозолей. Основными характеристиками РБГ и РАЗ являются:

1. Активная концентрация.
2. Изотопный состав.
3. Вид и энергия излучения.

Таблица 2.2 – Группы реперных радионуклидов для непрерывного радиационного технологического контроля [9]

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 , ^{136}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 , ^{665}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	

Активная концентрация – скорость распада атомов в единице объема, или активность единицы объема воздуха, выражаемая в соответствующих единицах (Ки).

Радиоактивные аэрозоли (РАЗ) – взвешенные частицы, находящиеся в воздухе. Классификация РАЗ основывается на различии существующих между дисперсионными и конденсационными аэрозолями, а также между аэродисперсионными системами с твердой и жидкой дисперсионными фазами.

Дисперсионные аэрозоли образуются при диспергировании твердых и жидких тел во взвешенное состояние.

Конденсационные аэрозоли образуются при объемной конденсации перенасыщенных паров и в результате газовых реакций, ведущих к образованию аэрозольных частиц.

Дисперсионные аэрозоли, как правило, обладают большей полидисперсностью и в случае твердой дисперсной фазы, обычно состоят из отдельных частиц неправильной формы.

Конденсационные аэрозоли, как правило, твердые частицы и представляют собой рыхлые агрегаты из большого числа первичных частиц. По дисперсности аэрозольные частицы можно классифицировать следующим образом:

1. Высокодисперсные аэрозоли с размером частиц $d < 10^{-5}$ см.
2. Грубодисперсные $d > 10^{-4}$ см.

3. Среднедисперсные от 10^{-5} до 10^{-4} .

Устойчивость аэрозолей определяется многими факторами и, прежде всего, размерами аэрозольных частиц.

Естественное разрушение аэрозолей происходит в результате трех основных процессов [9]:

- а) седиментация – оседание;
- б) диффузия – проникновение;
- в) коагуляция – слияние – soadelum – сгусток.

Седиментация – осаждение аэрозольных частиц под действием силы тяжести. (Характеристика для грубодисперсных аэрозолей).

Диффузия и коагуляция аэрозольных частиц в конечном итоге приводит к седиментации.

Аэрозольные частицы, как правило, электрически заряжены. В большинстве случаев они несут положительный заряд (при распаде).

2.1.4 Технические средства и методы контроля радиоактивных выбросов

В результате деления и захвата нейтронов в топливе накапливаются радиоактивные продукты, при этом изменяются состав, физико-химические и механические свойства топливной композиции. Несмотря на то, что в процессе деления образуется большое количество радиоактивных продуктов, диоксид урана при нормальных рабочих температурах удерживает более 98 % этих продуктов. Около 1...2 % продуктов, в основном газообразные и летучие – криптон, ксенон и йод, диффундируют в газовый объем между топливной композицией и оболочкой [9]. Оболочка твэла обеспечивает его целостность, механическую прочность, препятствует попаданию продуктов деления в 1-й контур. Герметичность оболочек должна сохраняться в течение всего срока работы твэла и последующего хранения отработанного топлива [8].

Методы измерения активных концентраций радиоактивных газов. Измерение активной концентрации радиоактивных газов занимает значительное место в системе радиационного контроля. Это обусловлено тем, что:

- при работе реактора они образуются в больших количествах;
- в силу своих физико-химических свойств легко проникают через различный вид неплотности, сигнализируя своим появлением о нарушении герметичности установки.

Контроль концентрации радиоактивных газов проводится в целях:

- обеспечения РБ;
- своевременного обнаружения неплотности в системах АЭУ (технологический контроль).

В настоящее время наибольшее распространение получил надежный и простой счетный метод измерения активной концентрации

радиоактивных газов. При этом измерение активной концентрации (активности) газов может производиться:

- путем отбора проб в фиксированный объем;
- непрерывной прокачкой воздуха через фиксированный объем.

Обычно такие объемы выполняются в форме цилиндра в торце, которого размещается детектор излучения.

Применение фиксированных объемов диктуется следующими требованиями:

- необходимостью предварительной подготовки пробы воздуха (очистки его от аэрозолей);
- необходимостью иметь постоянную геометрию измерения, для получения однозначной зависимости скорости счета импульсов на выходе детектора от активной концентрации (постоянство коэффициента регистрации).

В переносных приборах иногда применяются складывающиеся камеры цилиндрической формы (РВ–4) камера Туркина (рис. 2.5), в КРК–1 применяется металлический пробоотборник цилиндрической формы объемом 1 литр.

В качестве детекторов при измерении активности РБГ обычно используются торцовые газоразрядные счетчики (СБТ–11, СБТ–10, СБТ–16) [9]. Для установления зависимости между скоростью счета импульсов на выходе детектора и активной концентрацией газов, представим объем цилиндра в виде набора дисков толщиной dh и радиусом R . Тогда выражение для скорости импульсов будет:

$$n_0 = c \cdot s \cdot \int_0^h \omega \cdot dh, \quad (2.1)$$

где C – активная концентрация газа, распад/см³;

s – рабочая поверхность детектора, см²;

ω – геометрический коэффициент.

Для торцевого счетчика при $r < R$, где r – радиус входного окна счетчика.

Величина геометрического коэффициента находится по известному соотношению:

$$\omega = \frac{r^2}{2R^2} \left[1 - \frac{h}{\sqrt{R^2 + H^2}} - \frac{3}{8} \frac{h \cdot R^2 \cdot r^2}{(R^2 + h^2)^{5/2}} \dots \right]. \quad (2.2)$$

Подставим уравнение (2.1) в (2.2) и проинтегрируем. После интегрирования получим выражение для скорости счета импульсов.

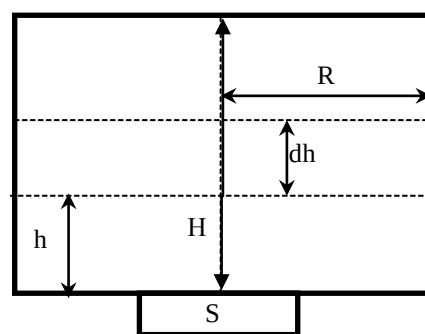


Рис. 2.5. Камера Туркина:

h – высота цилиндра см;

R – радиус цилиндра;

dh – толщина цилиндра,

S – рабочая поверхность детектора см²

$$n_0 = \frac{1}{2} C \cdot s \cdot \left[R + H - \sqrt{R^2 + H^2} - \frac{1}{8} \left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{R^2 \cdot r^2}{(R^2 + H^2)^{3/2}} \right) \right]. \quad (2.3)$$

Без существенной погрешности выражение (1.3) можно упростить, если пренебречь 4-м членом в квадратных скобках. Тогда:

$$n_0 = \frac{1}{2} C \cdot s \cdot (R + H - \sqrt{R^2 + H^2}) \quad (2.4)$$

Выражения (2.3) и (2.4) получены без учета поглощения β -частиц в газовом объеме цилиндра и во входном окне счетчика. С учетом этих факторов выражение для скорости счета импульсов будет иметь вид

$$n = n_0 \cdot K_v \cdot K_c, \quad (2.5)$$

где K_v и K_c – соответственно коэффициенты учитывающие поглощение β -частиц в газовом объеме и во входном окне счетчика.

Коэффициент поглощения частиц K_v определяется по соотношению:

$$K_v = \frac{\Delta_\beta \ln 2}{2\rho_v (R + H - \sqrt{R^2 + H^2})} \cdot \left[\frac{1 - K_c \cdot \left(\rho_v \frac{R \ln 2}{\Delta_\beta} \right) - K_c \left(\frac{\rho_v H \ln 2}{\Delta_\beta} \right) +}{+ K_c \left(\frac{\rho_v \sqrt{R^2 + H^2}}{\Delta_\beta} \cdot \ln 2 \right)} \right], \quad (2.6)$$

где Δ_β – слой половинного ослабления излучения, мг/см²;

ρ_v – плотность воздуха, мг/см³.

Коэффициент K_c определяется по соотношению:

$$K_c = (1 - \alpha)^{-\alpha} - \alpha^2 \cdot Ei(-\alpha), \quad (2.7)$$

где $\alpha = \frac{\delta_{\text{окна}} \cdot \ln 2}{\Delta_\beta}$ – величина, характеризующая поглощение β -частиц;

$\delta_{\text{окна}}$ – толщина входного окна счетчика, мг/см²;

$Ei(\alpha)$ – функция, значение которой находится из таблиц по данному значению α .

Для рассмотренной геометрии измерения оптимальные размеры измерительного объема можно определить из соотношения:

$$h/R = 1,64.$$

В этом случае коэффициент регистрации блока детектирования будет наибольшим.

В заключении можно сказать, что зависимость скорости счета импульсов на выходе детектора газового датчика связана с активной концентрацией газов, как при разовом отборе пробы воздуха, так и в случае непрерывной прокачки через измерительный объем. В обоих случаях аналитические зависимости $n = f(C)$ одинаковы.

Методы измерения активных концентраций радиоактивных аэрозолей. Измерение активной концентрации радиоактивных аэрозолей может быть сведено к двум основным методам:

- прямой метод;
- измерение дисперсной фазы аэрозолей на фильтре.

Основным недостатком прямого метода – является низкая чувствительность. Кроме того, практически невозможно учесть влияние на результаты измерений радиоактивных газов. В отдельных случаях это влияние по абсолютной величине может значительно превышать эффект от активной концентрации аэрозолей. Прямые методы не получили широкого распространения при определении активных концентраций радиоактивных аэрозолей.

В целях повышения чувствительности производят осаждение аэрозолей из большого объема воздуха на фильтр, посредством прокачки через него воздуха с помощью воздуходувки. Активная поверхность фильтра измеряется потом с помощью радиометрической установки.

По измеренной скорости счета импульсов определяется активная концентрация аэрозолей. Аэрозоли больших размеров эффективнее улавливаются при больших скоростях прокачки, тогда как высокодисперсные аэрозоли лучше улавливаются при малых скоростях прокачки.

Улавливающую способность фильтра часто характеризуют не эффективностью улавливания, а проскоком аэрозольных частиц через фильтры q_{ϕ} – величина проскока. Таким образом, комбинируя систему из нескольких фильтров можно достичь высокого коэффициента улавливания.

Основным недостатком волокнистых фильтров является высокое динамическое сопротивление потоку воздуха и значительное поглощение α - и β -излучения в материале фильтра. Последний фактор трудно поддается учету.

Измерение активной концентрации РАЗ может производиться осаждением их на неподвижный или на непрерывный движущийся фильтр.

Активность поверхности фильтра A_{ϕ} определяется по соотношению:

$$A_{\phi} = K_{\phi} \cdot Q_{\beta} \cdot C \cdot t, \quad (2.8)$$

где Q_{β} – расход воздуха л/с;

t – время прокачки;

C – активная концентрация РАЗ расп/л·с.

Из выражения (2.8) следует, что активность поверхности фильтра пропорциональна активной концентрации аэрозолей в воздухе и времени прокачки воздуха. Если величины K_{ϕ} , Q_{β} и t постоянны, то $A_{\phi} \approx C$, т.е. по

активности поверхности фильтра можно определить активную концентрацию аэрозолей в воздухе.

Скорость счета импульсов на выходе детектора при измерении активности фильтра и величина A_ϕ связаны соотношением:

$$n_0 \approx \eta \cdot A_\phi, \quad (2.9)$$

где η – коэффициент регистрации р/м установки зависящей от условий измерения.

Размеры активной поверхности фильтра обычно ограничены размером заборного окна, через который прокачивается воздух. Размеры окна, как правило, выбираются равными чувствительной поверхности детектора.

С учетом (2.8) и (2.9) активная концентрация аэрозолей в воздухе определится по соотношению:

$$C = \frac{n_0}{\eta \cdot K_\phi \cdot Q_\beta \cdot t}. \quad (2.10)$$

Вводя в формулу (2.10) множитель $3,7 \cdot 10^{10}$ получим активную концентрацию аэрозолей в воздухе в Бк/л.

При непрерывном перемещении ленты фильтра, накопление аэрозолей на ней определяется не только скоростью прокачки воздуха, но и скоростью перемещения ленточного фильтра. Скорость перемещения фильтра постоянна. В этом случае операция отбора пробы, перемещения и измерения фильтра осуществляется одновременно и непрерывно. На участке отбора пробы в этом случае происходят два процесса: увеличение активности за счет осаждения аэрозолей и ее уменьшение за счет выхода части активного фильтра за пределы отборного окна. Через определенный промежуток времени наступает динамическое равновесие, при котором количество активности, осаждающейся в единицу времени, становится равным количеству активности, осаждающейся в единицу времени, становится равным количеству активности, убывающей за пределы отборного окна вместе с фильтром.

Детектор смещен от отборного окна по ходу движения фильтра (рис. 2.6). Активность фильтра A_ϕ в момент равновесия при постоянной активной концентрации аэрозолей в случае заборного и смещенного окон прямоугольной формы будет:

$$A_\phi = K_\phi \cdot Q_\beta \cdot c \frac{L}{v}, \quad (2.11)$$

где v – скорость перемещения фильтра; L – ширина окна.

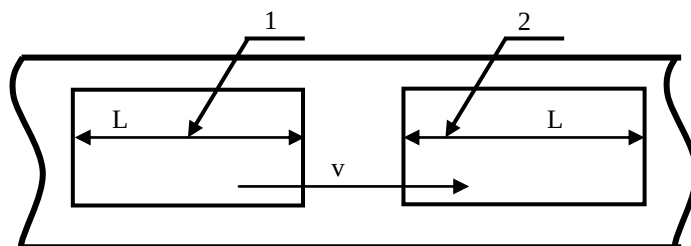


Рис. 2.6. Непрерывный отбор радиоактивных аэрозолей: 1 – отборонное окно; 2 – детектор

Для окон круглой формы:

$$A_{\phi} = \frac{16}{3\pi} \cdot K_{\phi} \cdot Q_{\beta} \cdot c \cdot \frac{R}{v}, \quad (2.12)$$

где R – радиус смещенного окна.

Выражения (2.10) и (2.11) справедливы в случае долгоживущих аэрозолей, период полураспада радионуклидов которых значительно превышает время отбора пробы воздуха и время измерения активности фильтра.

Состояние технологического оборудования ядерного реактора по реперным нуклидам на АЭС осуществляется с помощью ПТК АСРК «ВУЛКАН–РК», что и обеспечивает контроль радиационной обстановки в помещениях энергоблока АЭС в нормальных и аварийных условиях эксплуатации.

Контроль состояния оболочек тепловыделяющих элементов (состояния активной зоны реактора) осуществляется по:

- ОА теплоносителя первого контура в диапазоне $3,7 \cdot 10^7 \dots 3,7 \cdot 10^{12}$ Бк/м³ (ИК с БДМГ–08Р–03, БДМГ–08Р04) в нормальных и аномальных условиях;
- плотности потока запаздывающих нейтронов (ИК с УДИН–06Р);
- МПД гамма-излучения от трубопроводов САОЗ (ИК с блоками типа БДМГ–08Р) в аномальных и аварийных условиях.

Контроль состояния границы первого контура в условиях максимальной проектной аварии и запроектной аварии осуществляется по МПД гамма-излучения в центральном зале (ИК с УДМС–20Р).

Средства контроля радиоактивных газов и аэрозолей. Контроль течей теплоносителя первого контура во второй и промежуточный контуры (контроль состояния границы первого контура) осуществляется по:

- ОА радионуклидов в технологических трубопроводах продувки и общем коллекторе продувки парогенераторов (ИК с УДЖГ–20Р);
- ОА радионуклидов в воде промежуточного контура после теплообменников и в общем коллекторе промежуточного контура (ИК с УДЖГ–20Р);

- ОА радионуклидов и ОА азота-16 в паре основных паропроводов парогенераторов (ИК SGLM-201 Блок детектирования SG/NaI(Tl) с УДПГ-04Р);

- ОА ИРГ в парогазовой смеси системы воздухоудаления из конденсатора турбины (ИК с УДГБ-02Р);

- МПД гамма-излучения от трубопроводов после клапанов БРУ-А (ИК с БДМГ-08Р-04) в аварийных условиях;

- МПД гамма-излучения от трубопроводов на выходе системы воздухоудаления из конденсатора турбины (ИК с БДМГ-08Р-04) в аварийных условиях;

- ОА жидкости в контрольных баках, сбросных трубопроводах и каналах (ИК с УДЖГ-22Р1 и УДЖГ-22Р2).

Контроль течей теплоносителя первого контура в помещениях энергоблока АЭС осуществляется в помещениях АЭС и в вентиляционных коробах вентиляционных систем до фильтровальных установок по: ОА ИРГ (ИК с УДГБ-02Р); ОА аэрозолей (ИК с БДАС-03П-01); ОА йода-131 (ИК с УДАС-02П).

Контроль герметичности защитной герметичной оболочки реактора осуществляется по непрерывному контролю ОА ИРГ в межоболочечном пространстве (ИК с УДГБ-02Р), и дополняется периодическим контролем активности аэрозолей и радионуклидов йода, отбираемых на аэрозольные и йодные фильтры с рабочей поверхностью 20 см², установленные в фильтродержателе ФД-2Е, в соответствии с Регламентом и Инструкцией радиационной безопасности АЭС.

Контроль эффективности очистки и функционирования систем спецводоочистки осуществляется по:

- непрерывному контролю ОА радионуклидов в жидкости (ИК с УДЖГ-20Р);

- периодическому контролю активности проб жидкости, отбираемых в системах спецводоочистки;

- МПД гамма-излучения от поверхности баков сбора отработанных смол (ИК с блоками типа БДМГ-08Р).

Контроль эффективности очистки и функционирования системы спецгазоочистки осуществляется по непрерывному контролю ОА ИРГ в технологических контурах с помощью ИК с блоками БДМГ-08Р-03, БДМГ-08Р-04 и УДПГ-04Р, размещаемых у технологических контуров спецгазоочистки, и с помощью ИК с УДГБ-02Р.

Контроль изменения активности воздуха в приточных системах вентиляции БЦУ и РЦУ осуществляется по МПД гамма-излучения (ИК с БДМГ-08Р-03).

Контроль радиационной обстановки в помещениях энергоблока осуществляется по:

- МПД гамма-излучения (ИК с БДМГ–08Р–03, БДМГ–08Р–04 и БДМГ–08Р–05) в нормальных и отличных от нормальных условий;
- МПД гамма-излучения (ИК с УДМС–20Р) в отличных от нормальных условий и при проектных и за проектных авариях в центральном зале реакторного отделения;
- ОА ИРГ (ИК с УДГБ–02Р), ОА аэрозолей (ИК с БДАС–03П–01), ОА йода-131 (ИК с УДАС–02П).

Непрерывный контроль радиационных параметров дополняется периодическим контролем, который осуществляется посредством отбора проб среды на аэрозольные и йодные фильтры, установленные в фильтродержатели ФД–2Е, и последующего измерения бета-активности отобранных на фильтры проб аэрозолей и йода с помощью радиометров РКС–18Р в диапазоне $1 \dots 1 \cdot 10^5$ Бк.

С помощью периодического контроля решаются следующие задачи:

- контроль эффективности фильтровальных установок вентиляционных систем путем сравнения активности проб аэрозолей или йода на фильтрах, отобранных до и после фильтровальных установок;
- контроль радиационной обстановки в технологических помещениях энергоблока и состояние технологического оборудования по активности проб аэрозолей и йода на фильтрах.

Разработанные, с участием Института ядерных исследований НАН, и прошедшие рабочие испытания на АЭС с комплексы СТПК–01, позволяют оперативно и надежно идентифицировать большое количество гамма-излучающих радионуклидов в диапазоне энергий ($50 \div 3000$) кэВ и определять их активности в диапазоне величин ($3,7 \cdot 10^3 \div 3,7 \cdot 10^8$) Бк/кг.

Наиболее опасными в радиационном отношении и определяющими удельную активность теплоносителя являются радионуклиды йода. Высокий выход йода при делении, летучесть при рабочих температурах ядерного топлива и низкие значения предельно-допустимых поступлений в организм подтверждают, что эти радионуклиды представляют главную проблему в обеспечении радиационной безопасности с точки зрения внутреннего облучения персонала и определенной части населения.

В целях прогнозирования биологической опасности при протечках теплоносителя предусмотрено измерение объемной активности ^{132}I в теплоносителе устройством детектирования УДЖГ–08Р (УДЖГ–13Р1 и БМ–06Р). В связи с тем, что в одной из ниток системы СВО–1 стоит фильтр смешанного действия, то устройство детектирования УДЖГ–08Р устанавливается на байпасной линии от другой нитки, выведенной в пом. А–305, с отбором пробы после катионитового фильтра для уменьшения вклада других радионуклидов, но до анионитового фильтра, сорбирующего радионуклиды йода. В этом случае обеспечивается задержка радионуклидов, находящихся в теплоносителе в виде катионов, и временная задержка теплоносителя для уменьшения влияния короткоживущих радионуклидов.

Устройство детектирования УДЖГ–08Р преобразует плотность потока каскадных гамма–квантов с энергиями от $1,07 \cdot 10^{-13}$ до $1,22 \cdot 10^{-13}$ Дж (от 0,67 до 0,76 МэВ) в последовательность статистически распределённых импульсов, средняя частота которых пропорциональна объёмной активности радионуклидов йода, растворённого в теплоносителе.

Информация от них поступает на ЩРК (показания, сигнализация и регистрация) и на БЩУ–О (показания и сигнализация).

В СРК предусмотрен также контроль активности теплоносителя после максимально возможной проектной аварии. Отбор пробы для контроля осуществляется после насоса низкого давления и теплообменников САОЗ в байпасную линию, выводимую в пом. А–258. Контроль активности теплоносителя в байпасной линии ведётся с использованием блоков детектирования типа БДМГ–41–01 (3 шт.) и БДМГ–41–02 (3 шт.).

От одной пары блоков информация поступает на АМП–12, установленный на РЩУ, от другой – на ЩРК и от третьей – на АМП–12, установленный на БЩУ.

Наиболее вероятными местами нарушения герметичности первого контура являются парогенераторы и вспомогательные контура и трубопроводы. Нарушение может произойти как вследствие развития технологических дефектов, возникающих в процессе изготовления и монтажа оборудования (некачественная термическая обработка, дефекты сварки, наличие конструкционных и технологических концентраций напряжений в основном металле или металле сварного шва, межкристаллическая коррозия, применение не предусмотренных проектом марок стали и т.п.), так и в результате воздействий эксплуатационных условий (больших напряжений от некомпенсированных тепловых расширений или от весовых нагрузок, вибрации оборудования, температурных колебаний и ударов, вызывающих термическую усталость металла, коррозии металла, отклонения от номинальных).

Измерение активности радионуклидов азота–16, аргона, криптона и ксенона в остром паре осуществляется с помощью сцинтилляционного детектора. Контроль осуществляется путём установки устройств детектирования УДПГ–03Р (УДПГ–01 и БМ–04Р) непосредственно около трубопроводов острого пара на расстоянии 5...10 мм от поверхности трубопровода. Устройство УДПГ–03Р предназначено для преобразования информации о плотности потока гамма–квантов в пропорциональный ему по плотности поток импульсных электрических сигналов и применяется для контроля активности газообразных и летучих радионуклидов, поступающих вместе с паром во 2-й контур, при нарушении герметичности парогенераторов. Превышение скорости счёта блока детектирования типа БДПГ–11 устройства УДПГ–03Р над фоновым значением пропорционально плотности потока гамма–квантов, падающих

на торец блока и, следовательно, объёмной активности радионуклидов, содержащихся в паре.

Учитывая важность контролируемого параметра для безопасности, у каждого трубопровода острого пара устанавливается по 3 устройства типа УДПГ–03 с выводом информации от одного из них на ЩРК (показания, сигнализация и регистрация), БЩУ–О (показания и сигнализация), от другого – на АМП–12 на БЩУ–Н (показания и сигнализация) и от третьего – на АМП–12 на РЩУ (показания и сигнализация).

Одним из мест нарушения герметичности 1-го контура являются теплообменники промконтуров. Контроль герметичности теплообменников промконтуров в СРК проводится непрерывно и дистанционно по теплообменникам СУЗ, охладителю организованных протечек 1-го контура и общему коллектору остальных теплообменников (промконтур ГЦН). Отбор проб воды промконтуров на устройства детектирования осуществляется в байпасные линии, выводимые из пом. А–307 в пом. А–504.

Контроль за ГАВ обеспечивается с помощью спектрометрических радиометров типа УДИ–1Б – для непрерывного контроля О.А. р/н йода $^{131-133}\text{I}$, ^{135}I , после прокачки воздуха через сорбционную камеру, где радиоактивный йод поглощается и регистрируется сцинтилляционным детектором; УДГ–1Б для непрерывного контроля О.А. бета-излучающих ИРГ (аргон, криптон, ксенон); УДА–1АБ для непрерывного контроля О.А. радиоактивных аэрозолей, содержащих альфа и бета активности при прокачки воздуха через фильтр, где расположен полупроводниковый детектор. Работа всех перечисленных радиометров основана на прокачке анализируемого воздуха, где аэрозоли определяются после осаждения аэрозолей на фильтровальную ленту типа ЛФС, а радиоактивных газов после осаждения аэрозолей и попадания газа в рабочую камеру.

В зависимости от назначения и условий проведения измерений аэрозолей применяются различные типы аналитических фильтров, основные характеристики которых показаны в Приложении 4.

Существует и переносной вариант отбора проб для измерения радиоактивных газов, аэрозолей прибор КРК–1 предназначенный для измерения концентрации альфа- и бета-активных изотопов в твердых, жидких и газообразных веществах.

Принцип работы радиометра КРК–1 основывается на измерении количества альфа- или бета-частиц, выходящих из предварительно отобранной и обработанной пробы контролируемого вещества.

Измерение количества альфа-частиц производится с помощью блока детектирования БДИА–01, а бета-частиц – блоком детектирования БДИБ–01, подключенных к счетному устройству УСЦ–01. Отбор проб осуществляется с помощью пробоотборника ППА–2 или ППА–3.

2.2. Методы и средства снижения радиоактивности газов и аэрозолей

2.2.1. Методы снижения активности

При принятии решения об очистке технологических газов рассматривают вопросы экономики и защиты окружающей среды и человека.

Если удаляемое вещество газообразно, возможны два альтернативных варианта очистки: адсорбция или абсорбция примесей из газовой среды, либо химические превращения компонентов смеси. Механизм этих методов основан на диффузии газа либо к поверхности поглощающей жидкости, либо твердого адсорбента или катализатора, либо в реакционную зону с лучшей химической реакцией.

Абсорбция – сорбция газа за счет его проникновения (диффузии) в массу сорбента, приводящая к образованию твердого раствора. Так как диффузия газов в твердых телах происходит весьма медленно, то процесс абсорбции газа твердым телом характеризуется малой скоростью и требует большого времени для своего завершения.

Адсорбция – уплотнение газа на поверхности твердого тела (адсорбента). Если адсорбция газа происходит при температуре ниже критической, то может произойти сжижение сильно сжатого адсорбированного слоя газа (пара). В рассматриваемом процессе это сжижение является результатом действия адсорбционных сил. Как чисто поверхностное явление адсорбционный процесс характеризуется весьма большой скоростью, и для адсорбентов, лишенных пор, процесс завершается практически мгновенно. Адсорбция газов пористыми адсорбентами происходит много медленнее, так как в узких порах газы диффундируют медленно. Однако все же процесс завершается в зависимости от характера пористости адсорбента в несколько секунд или минут.

Капиллярная конденсация – сорбция пара за счет его конденсации в порах сорбента. Это явление обусловлено понижением упругости насыщенного пара в узких порах (капиллярах) сорбента и является эффектом, создаваемым капиллярными силами на сорбентах, лишенных посторонних газов. Процесс капиллярной конденсации происходит достаточно быстро и обычно завершается в течение нескольких минут.

Хемосорбция – химическое взаимодействие газа с твердым телом, происходящее либо на поверхности тела, если продукт реакции покрывает поверхность хемосорбента пленкой, непроницаемой для газа, или распространяющееся на всю массу хемосорбента.

Твердые вещества, наиболее пригодные для адсорбции, имеют высокую пористость, хорошо развитую поверхность с большой

эффективной площадью. Часто стремятся создавать материалы с такими поверхностными свойствами, которые были бы способны селективно адсорбировать молекулы данного типа или ряд молекул таких типов. Существенными характеристиками твердых веществ, используемых в качестве адсорбентов, являются твердость, склонность к слеживанию при работе в адсорбере и механическая прочность. Кроме того, к сорбенту предъявляются требования простоты регенерации после насыщения газом и многократного пользования.

В качестве адсорбентов нашли широкое применение такие материалы: уголь, глинозем, силикагель, цеолит. Все они обладают указанными свойствами.

Адсорбция газа на поверхности твердого тела проходит в несколько стадий. Первая стадия процесса – перенос молекул газа к внешней поверхности твердого вещества. Он зависит от размеров и формы молекул, пустот между гранулами и величиной движущей силы. Последняя зависит от разницы концентраций удаляемой примеси в объеме газа и на поверхности твердого тела, т.е. от достигнутой степени насыщения. Диффузионные характеристики системы учитываются коэффициентом массопереноса, который, в свою очередь, зависит от скорости, вязкости и плотности газа, коэффициента диффузии адсорбируемого газа, размера гранул.

Вторая стадия адсорбции характеризуется тем, что молекулы газа проникают в поры твердого вещества, на третьей стадии происходит адсорбция молекулы в определенной области поры. Третья стадия протекает очень быстро по сравнению с двумя первыми.

Иногда после адсорбции молекулы проникают в твердое тело за счет внутренней диффузии. На активированном угле, например, эта стадия протекает быстро и не влияет на скорость адсорбции.

Процесс адсорбции сопровождается выделением тепла. В случае чисто физической адсорбции выделяемое тепло равно теплоте конденсации. При химической адсорбции количество выделяемого тепла больше. Удаление молекул с поверхности твердого тела требует подвода тепла к поверхности для испарения молекул.

Адсорбенты могут быть разделены на три группы: 1) неполярные твердые вещества, где происходит в основном адсорбция; 2) полярные твердые вещества, где происходит химическая адсорбция без изменения химической структуры молекул газа и поверхности адсорбента; 3) вещества, на поверхности которых протекает чисто химическая адсорбция [5].

Полярными адсорбентами являются широко известные силикагель, синтетические цеолиты, а также оксиды металлов, активированный глинозем и др. Эти материалы обладают сродством, как к полярным, так и к неполярным молекулам и будут адсорбировать скорее полярные, чем

неполярные молекулы. Полярные адсорбенты обычно используют для удаления из газовых потоков водяных паров, диоксида углерода, аммиака и др. Поэтому их применяют для очистки инертных и природных газов.

Синтетические цеолиты, называемые иногда молекулярными ситами, представляют собой алюмосиликаты натрия или кальция, активированные нагреванием, при котором удаляется кристаллизационная вода. Основным достоинством молекулярных сит является то, что их можно использовать для сушки газов при высоких температурах, когда силикагель и глинозем теряют свою эффективность. В системах очистки технологических газов АЭС используется еще то важное обстоятельство, что синтетические цеолиты способны глубоко (до точки росы ниже 203 К) осушать газовую смесь и имеют большую емкость по влаге даже при низкой относительной влажности.

Единственным материалом в группе неполярных твердых веществ, имеющих промышленное значение, является уголь, состоящий практически полностью из нейтральных атомов одного вида и имеющий поверхность с равномерным распределением зарядов на молекулярном уровне без градиента потенциалов. На такой поверхности не наблюдается преимущественная фиксация полярных молекул по сравнению с неполярными.

Активированные угли принадлежат к наиболее давно известным адсорбентам. Активированный уголь (часто называемый древесным углем, поскольку его получают из дерева) образуется при пирогенном разложении (пиролизе) подходящих сортов каменного угля, торфа или дерева. Сырьем могут быть также и многие другие материалы: лигнин, битуминозные угли и скорлупа орехов. Промышленные активированные угли хорошего качества с очень большой эффективной поверхностью получают из скорлупы кокосовых орехов, обугленной при температуре около 1150 °С и затем активированные путем обработки водяным паром.

Непременным условием эффективного использования угля в том или ином конкретном процессе является соответствие его качеств условиям данного процесса. Качество активированного угля в общем случае определяется характером его пористой структуры и природой поверхности. В случае очистки газообразных смесей от благородных газов, криптона и ксенона, адсорбция которых обязана проявлению чисто физических сил и, прежде всего, дисперсионных, фактором, определяющим процесс, будет именно пористая структура сорбента. В адсорбции благородных газов основную роль играют микропоры.

Для очистки отходящих газов АЭС с водо-водяными реакторами, которые составляют атомную энергетику, широко используют адсорбционный метод очистки, в частности способ динамической адсорбции радионуклидов криптона и ксенона в колонне, работающей в режиме непрерывного потока. Системы, основанные на этом способе,

наиболее просты в техническом отношении и в то же время достаточно эффективны. Проточная колонна обеспечивает очистку в $10^2 - 10^4$ раз, что позволяет поддерживать активность газовых выбросов АЭС значительно ниже норм.

В промышленности для удаления газообразного компонента используют, как мы уже отмечали, абсорбцию, адсорбцию или химическое превращение. На АЭС нашли применение преимущественно способы, основанные на адсорбции и выдержке, поскольку обезвреживанию подлежат в основном радионуклиды инертных газов. Исследуют, разрабатывают и используют и методы абсорбции и каталитического сжигания, например, для удаления трития, летучих соединений йода и других радиоактивных веществ. Мы ограничимся рассмотрением очистки технологических газов АЭС в основном от радионуклидов криптона, ксенона и йода.

В методах адсорбции и абсорбции используют процессы переноса молекул газа из общей массы к поверхности жидкости или твердого тела.

В случае жидкости молекулы газа в дальнейшем диффундируют во всем объеме жидкости, тогда как на поверхности твердого тела они удерживаются физическими или химическими силами. Когда поверхность жидкости или твердого тела вступает в контакт с газом, диффузия молекул газа протекает по законам молекулярной диффузии, и скорость ее зависит от температуры и давления газа и типа газовых молекул.

В настоящее время нашли применение два способа удаления криптона и ксенона из технологических газов АЭС: адсорбция на активированном угле и криогенная дистилляция. Есть сообщения в печати о лабораторных и полупромышленных испытаниях способов жидкостной экстракции (селективная абсорбция), разделения полупроницаемыми мембранами, удаления в геологические формации.

Принципы очистки. Существуют следующие основные принципы фильтрации воздуха от пыли, аэрозолей и йода:

- эффект отсеивания (рис. 2.7) – задерживаются частицы с диаметром, превышающим зазор между волокнами;

- эффект инерции (рис. 2.8) – крупные частицы имеют массу и импульс, достаточные для того, чтобы не отклоняться от линии тока воздуха и столкнуться с волокном фильтра при обтекании его воздушным потоком;

- эффект перехвата (рис. 2.9) – небольшие легкие частицы следуют с потоком воздуха вокруг волокна фильтра. Если частица следует по траектории, которая расположена от волокна на расстоянии менее ее радиуса, то происходит зацепление и частица касается волокна;

- эффект диффузии (рис. 2.10) – частицы с малой массой не следуют линиям потока воздуха вокруг волокна фильтра.

Их хаотическое движение (известное как броуновское движение) вызвано постоянными столкновениями с другими частицами и молекулами газа, в котором они находятся во взвешенном состоянии. В процессе такого движения частицы могут касаться волокон фильтра или ранее захваченных частиц.

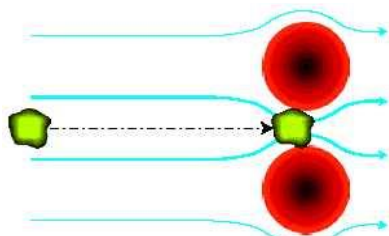


Рис. 2.7. Эффект отсеивания

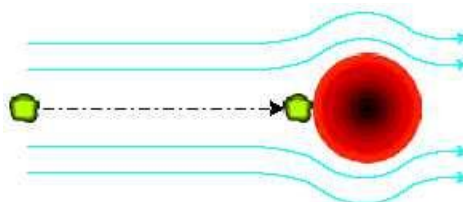


Рис. 2.8. Эффект инерции

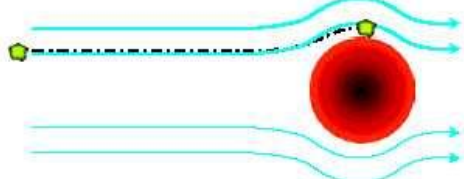


Рис. 2.9. Эффект перехвата

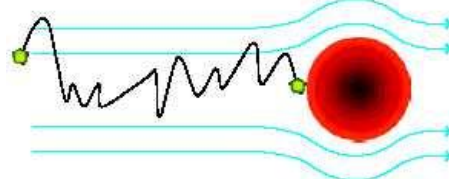


Рис. 2.10. Эффект диффузии

На частицы, столкнувшиеся с волокном фильтра или с ранее осевшей частицей, действуют силы, величина которых достаточно велика, чтобы удержать частицу.

Существует еще электростатический эффект, но он постепенно ослабевает с течением времени, кроме того, он чувствителен к выхлопам дизельных двигателей. Считается, что эффект отсеивания играет значительно меньшую роль, т.к. он важен только для частиц большого размера, количество которых в воздухе очень мало.

Низкая скорость повышает эффект диффузии и понижает эффект инерции. Это означает, что для отделения малых частиц необходима низкая скорость, а для крупных частиц – высокая скорость, необходимо также волокно меньшего диаметра. Поэтому для тонкой фильтрации используется материал на основе тончайших стекловолоконных нитей.

Большинство опасных для здоровья человека частиц, например, бактерии, вирусы, масляный и табачный дым, металлургическая пыль имеют размер менее 1 мкм, что составляет 99,9 % всех частиц в атмосфере, имеют размер менее 1 мкм. Следовательно, качественные фильтры должны отделять частицы размером менее 1 мкм, поэтому необходимо использовать эффекты диффузии и перехвата и предпочтительнее применять для фильтров стекловолоконный материал. О характеристиках воздушных фильтров трудно судить по внешнему виду, а частицы, которые они должны улавливать, часто не видны невооруженным глазом.

На большинстве АЭС отходящие газы удаляли во внешнюю среду через вентиляционные трубы с разбавлением атмосферным воздухом до

допустимых концентраций. Более высокоактивную часть отходящих газов, связанную преимущественно с организованными протечками, направляли в емкости выдержки под давлением – газгольдеры, опорожняемые периодически с определенным интервалом.

За рубежом нашли применение удаление и обезвреживание радиоактивных отходящих газов способом криогенной дистилляции и адсорбции. В публикациях отмечается, что криогенная дистилляция эффективно разделяет газы; может применяться как на реакторах с водой под давлением, так и с кипящей водой, при нормальной эксплуатации и в аварийных ситуациях. На установках сначала удаляют такие газы, как кислород, озон, углекислота, окись озона, а затем отделяют и концентрируют криптон и ксенон, имеющие температуру кипения 120 и 165K соответственно. Криптон и ксенон выдерживают в специальных контейнерах. Способ криогенной дистилляции обеспечивает высокий коэффициент очистки в диапазоне от 10^4 до 10^6 раз, в том числе и от долгоживущего ^{85}Kr . Разновидность способа — использование криогенных фильтров с активированным углем. Для обеспечения высоких коэффициентов очистки угольные фильтры работают циклами в режиме до проскока с последующей регенерацией, например, путем нагревания. В результате криптон и ксенон выводят из угля и собирают в специальные контейнеры.

Наиболее широкое распространение на отечественных и зарубежных атомных станциях получила адсорбционная очистка технологических газов. Этому методу в настоящей работе уделено основное внимание.

2.2.2. Адсорбционные свойства цеолитов и активированных углей

Адсорбционные свойства цеолитов. Цеолиты – кристаллические алюмосиликаты, состоящие из кремнекислородных и алюмокислородных тетраэдров (Si, Al) O_4 .

Цеолиты являются нестехиометрическими соединениями, составы которых изменяются в широких пределах, образуя ряды твердых растворов. Кристаллические структуры цеолитов состоят из тетраэдров SiO_2 и AlO_4 , соединенных вершинами в ажурные каналы в полостях и каналах которых находятся катионы и молекулы воды.

Природный цеолит относится к устойчивым алюмосиликатам с каркасным строением кристаллической решетки, имеющий слоистую структуру.

Промышленная ценность цеолитов обусловлена общим для минералов ажурным алюмокремниевым каркасом, образующим систему полостей и каналов. Размер входных окон достаточно велик ($0,0260 \div 0,270$ нм), что позволяет проникнуть в них молекулам и ионам большинства неорганических и органических соединений. В полостях содержится

поглощенная вода и катионы щелочных и щелочноземельных металлов, которые химически слабо связаны с каркасом. При осторожном нагревании цеолита до 400 °С вода легко удаляется без нарушения кристаллической решетки минерала. По данным японских ученых, при нагревании клиноптилолита до 300 °С он обезвоживается почти на 80 %. После дегидратации цеолит представляет собой микропористую «губку» с объемом пор до 50 % каркаса. Такая губка может снова адсорбировать воду и другие жидкие и газообразные вещества. Адсорбционный объем природных цеолитов определяется по поглощению паров воды и достигает 0,2 см³/см³.

Другое, не менее важное свойство, способность к легкому катионному обмену, происходящему также без каких-либо нарушений кристаллической структуры. Ионно-обменная емкость цеолитов зависит от их природы и месторождения и колеблется в пределах 2...5 мг-экв/г.

Цеолиты способны поглощать и выделять не только воду, но и другие различные молекулы без изменения кристаллической структуры.

Химический состав цеолитов в обобщенном виде может быть представлен формулой $M_{x/n} (AlO_2)_x (SiO_2)_y zH_2O$, где М – катионы с валентностью n (обычно это Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Ba²⁺, Si²⁺, Mg²⁺), z – число молекул воды, а отношение y/x может изменяться от 1 до 5 для различных видов цеолитов.

Из природных цеолитов наибольшую значимость имеют клиноптилолит и морденит.

Встречаются несколько типов цеолитов: тип А Na₁₂[Al₁₂Si₁₂O₄₈]·24·H₂O; тип X Na_n[Al_nSi_{192-n}O₃₈₄]·260 H₂O 87 ≥ n ≥ 83; тип Y Na_n[Al_nSi_{192-n}O₃₈₄]·260·H₂O 75 ≥ n ≥ 56.

Лишенный воды цеолит представляет собой микропористую кристаллическую «губку», объем пор в которой составляет до 50 % объема каркаса цеолита. Такая «губка», имеющая диаметр входных отверстий от 0,3 до 1 нм (в зависимости от вида цеолита) является высокоактивным адсорбентом. Диаметр входных отверстий «губки» имеет строго определенные размеры. В связи с этим происходит так называемый молекулярно-ситовый отбор при сорбции молекул из газа в жидкости. Свойства цеолитов позволяют сорбировать смеси даже в тех случаях, когда разница в размерах молекул составляет 10...20 нм.

Ионообменные свойства цеолитов определяются особенностями химического сродства ионов с кристаллической структурой цеолита. При этом, также, как и при адсорбции молекул, необходимо соответствие размеров входных отверстий в цеолитовый каркас и замещающих ионов. Ионным обменом на цеолитах удастся выделить ионы, извлечение которых другим методом часто представляет большую сложность. Ионоситовый эффект позволяет адсорбировать из газовых и жидких систем пары азота, CO₂, SO₂, H₂S, Cl₂, NH₃. Установлена способность цеолитов адсорбировать

радиоактивные ионы цезия из растворов, удалять NH_4^+ из сточных вод и водоемов, извлекать ионы Cu , Hb , Zn , Cd , Ba , Co , Ag и других металлов из промышленных сточных вод, очищать природные газы [9]. Емкость поглощения цеолитов в 30 раз выше, чем у ионообменных смол. В среднем при расчетах способности обмениваться на ионы NH_4^+ рекомендуется брать 2 мэкв на 1 грамм массы цеолита. Уникальная ионообменная селективность в отношении радионуклидов и тяжелых металлов и позволяет применить цеолиты для очистки в системе очистки АЭС.

Цеолиты получают путем гидротермального синтеза в виде кристаллов с размерами порядка микрометра. Благодаря жестким алюмосиликатным скелетам, практически не изменяющимся в процессе дегидратации, после удаления воды образуются пористые кристаллы с полостями молекулярных размеров. Полости соединены более узкими отверстиями – "окнами". Например, в цеолитах типа А имеются большие полости с диаметрами 11,4 и окнами 4,2 А и малые полости 6,6 и окнами 2,5 А; цеолиты типа Х имеют несколько большие полости с окнами 8 – 9 А.

Кристаллическая решетка цеолитов, образованная сложными анионными радикалами, всегда обладает остаточными зарядами. Их компенсируют катионы, располагающиеся во внутренних полостях решетки. Чаще всего это катионы натрия и кальция. В связи с этим цеолит обладает не только свойствами сорбента, но и ионообменника.

По своим размерам большие полости цеолитов мало чем отличаются от размеров микропор углей и, следовательно, должны также сорбировать те же молекулы. Однако наличие в цеолитах катионов придает им свои специфические особенности.

Результаты ряда работ свидетельствуют о том, что даже в случае цеолитов различных структурных типов определяющее значение для сорбции таких молекул, как H_2O , NH_3 , CO_2 , имеют не структурные особенности решетки, а катионная плотность. Анализ колебательных спектров полярных молекул и их теплоты адсорбции позволил установить, что специфические взаимодействия аммиака и воды происходят в основном в результате взаимодействия свободных электронных пар азота и кислорода с катионами поверхности. Исходя из сказанного выше, следует ожидать значительно большей сорбции полярных молекул на цеолитах по сравнению с их сорбцией на неспецифических сорбентах.

Адсорбционная емкость цеолитов разных типов по отношению к инертным газам существенно отличается. На цеолите NaA даже при температуре до 100К практически не сорбируются аргон, азот, криптон и ксенон, что, по-видимому, обусловлено молекулярно-ситовым действием. Сорбционная емкость цеолита CaA значительно выше. В его внутренние полости свободно проникают даже молекулы тяжелых атомов.

Наилучшей сорбционной способностью обладал цеолит Linde 5A и очень плохо сорбировал криптон цеолит 4A.

Отечественные цеолиты (NaX, NaA и CaA) имеют различные сорбционные способности в динамических условиях. Наибольшей сорбционной способностью обладает цеолит CaA и практически не сорбирует NaA. С увеличением влажности цеолита сорбция уменьшалась вплоть до нуля (для NaA) (табл. 2.3) [8].

Таблица 2.3 –Коэффициенты сорбции благородных газов на отечественных цеолитах при температуре 303 К, см/г

Марка цеолитов	Криптон	Ксенон	Аргон
NaX, промышленная партия	4...8	20...40	2,2
CaX, из набора «Молекулярные сита»	9	50	3,0
NaA, полупромышленная партия	0,5...0,8	0...0,5	–

Адсорбция молекул цеолитами протекает на катионах при участии алюмосиликатного каркаса. Катионы цеолита могут участвовать и в ионном обмене. Молекулярные сита обладают большей емкостью по отношению к радиоактивным ионам. Цеолит NaA проявляет высокую адсорбционную способность по отношению к стронцию, особенно в области низких концентраций. При сорбции ионов на цеолитах, как и в случае сорбции газов, важен и ситовый эффект. Чтобы проникнуть в каналы цеолита, гидратированный ион должен быть по своим размерам меньше диаметра входных окон.

Степень осушки газов цеолитами зависит от параметров процесса регенерации: температуры регенерации цеолита и содержания влаги в продувочном газе. Практически полностью влага удаляется из цеолита при продувке сухим газом.

Адсорбционная емкость инертных газов на цеолитах различных типов отличается. На цеолите NaA при температуре до 100К практически не сорбируются аргон, криптон, ксенон, что, по-видимому, обусловлено молекулярно-ситовым действием. Сорбционная емкость цеолита CaA значительно выше. В его внутренние полости свободно проникают молекула тяжелых атомов.

Наибольшая адсорбция Kr и Xe происходит на цеолите CaA, а на NaX и CaX – несколько хуже. Коэффициент адсорбции у Xe на этих цеолитах выше, чем у Kr [8].

Адсорбция молекул цеолитами протекает на катионах при участии алюмосиликатного каркаса. Катионы цеолита участвуют в ионном обмене. Молекулярные сита обладают больше емкостью по отношению к радиоактивным ионам. Цеолит NaA проявляет высокую адсорбционную способность по отношению к стронцию, особенно в области низких концентраций. При сорбции ионов на цеолитах, как и в случае сорбции газов, важен и ситовый эффект.

Твердые вещества, наиболее пригодные для адсорбции, имеют высокую пористость, хорошо развитую поверхность с большой эффективной площадью. Часто стремятся создавать материалы с такими поверхностными свойствами, которые были бы способны селективно адсорбировать молекулы данного типа или ряд молекул таких типов. Существенными характеристиками твердых веществ, используемых в качестве адсорбентов, являются твердость, склонность к слеживанию при работе в адсорбере и механическая прочность. Кроме того, к сорбенту предъявляются требования простоты регенерации после насыщения газом и многократного пользования.

В качестве адсорбентов нашли широкое применение такие материалы: уголь, глинозем, силикагель, цеолит. Все они обладают указанными свойствами.

Адсорбция газа на поверхности твердого тела проходит в несколько стадий. Первая стадия процесса — перенос молекул газа к внешней поверхности твердого вещества. Он зависит от размеров и формы молекул, пустот между гранулами и движущей силы. Последняя зависит от разницы концентраций удаляемой примеси в объеме газа и на поверхности твердого тела, т.е. от достигнутой степени насыщения. Диффузионные характеристики системы учитываются коэффициентом массопереноса, который, в свою очередь, зависит от скорости, вязкости и плотности газа, коэффициента диффузии адсорбируемого газа, размера гранул.

Вторая стадия адсорбции характеризуется тем, что молекулы газа проникают в поры твердого вещества, на третьей стадии происходит адсорбция молекулы в определенной области поры. Третья стадия протекает очень быстро по сравнению с двумя первыми.

Иногда после адсорбции молекулы проникают в твердое тело за счет внутренней диффузии. На активированном угле, например, эта стадия протекает быстро и не влияет на скорость адсорбции.

Процесс адсорбции сопровождается выделением тепла. В случае чисто физической адсорбции выделяемое тепло равно теплоте конденсации. При химической адсорбции количество выделяемого тепла больше. Удаление молекул с поверхности твердого тела требует подвода тепла к поверхности для испарения молекул.

Адсорбенты могут быть разделены на три группы: 1) неполярные твердые вещества, где происходит в основном адсорбция; 2) полярные твердые вещества, где происходит химическая адсорбция без изменения химической структуры молекул газа и поверхности адсорбента; 3) вещества, на поверхности которых протекает чисто химическая адсорбция.

Полярными адсорбентами являются широко известные силикагель, синтетические цеолиты, а также оксиды металлов, активированный глинозем и др. Эти материалы обладают сродством, как к полярным, так и

к неполярным молекулам и будут адсорбировать скорее полярные, чем неполярные молекулы. Полярные адсорбенты обычно используют для удаления из газовых потоков водяных паров, диоксида углерода, аммиака и др. Поэтому их применяют для очистки инертных и природных газов.

Синтетические цеолиты, называемые иногда молекулярными ситами, представляют собой алюмосиликаты натрия или кальция, активированные нагреванием, при котором удаляется кристаллизационная вода. Основным достоинством молекулярных сит является то, что их можно использовать для сушки газов при высоких температурах, когда силикагель и глинозем теряют свою эффективность. В системах очистки технологических газов АЭС используется еще и то важное обстоятельство, что синтетические цеолиты способны глубоко (до точки росы ниже 203 К) осушать газовую смесь и имеют большую емкость по влаге даже при низкой относительной влажности.

Единственным материалом в группе неполярных твердых веществ, имеющих промышленное значение, является уголь, состоящий практически полностью из нейтральных атомов одного вида и имеющий поверхность с равномерным распределением зарядов на молекулярном уровне без градиента потенциалов. На такой поверхности не наблюдается преимущественная фиксация полярных молекул по сравнению с неполярными.

Для очистки отходящих газов АЭС с водо–водяными реакторами, которые в настоящее время составляют основу атомной энергетики в странах СНГ и за рубежом, широко используют адсорбционный метод очистки, в частности способ динамической адсорбции радионуклидов криптона и ксенона в колонне, работающей в режиме непрерывного потока. Системы, основанные на этом способе, наиболее просты в техническом отношении и в то же время достаточно эффективны. Проточная колонна обеспечивает очистку в $10^2 - 10^4$ раз, что позволяет поддерживать активность газовых выбросов АЭС значительно ниже норм, установленных санитарными правилами.

Адсорбционные свойства активированного угля. Санитарные правила ОСПУ–2005 требуют, чтобы на АЭС предусматривали системы очистки вентиляционного выбросного воздуха от радиоактивных аэрозолей и парообразных соединений йода. Степень очистки вентиляционного воздуха и технологических сдувок должна быть такой, чтобы выброс радиоактивных газов и аэрозолей не превышал установленных значений ДВ [1]. Во всех случаях воздух из помещений зоны строгого режима должен выбрасываться во внешнюю среду через вентиляционную трубу высотой 100 – 150 м. Расходы вентиляционного воздуха, подлежащего очистке, достигают для блока мощностью 1000 МВт сотен тысяч кубометров в час. Очистка таких объемов воздуха от ИРГ экономически

нецелесообразна и, как правило, в ней нет необходимости, так как их количество не превышает допустимого СП АЭС. Вместе с тем требуется очистка вентиляционного воздуха АЭС от аэрозолей, хотя массовая концентрация аэрозолей в этих случаях низка. Поэтому, хотя методы, применяемые для очистки воздуха от радиоактивных аэрозолей, сходны с обычными методами очистки газов от пыли, для этого требуются другие технические решения, другие материалы и оборудование.

Активированные угли принадлежат к наиболее давно известным адсорбентам. Активированный уголь (часто называемый древесным углем, поскольку его получают из дерева) образуется при пирогенном разложении (пиролизе) подходящих сортов каменного угля, торфа или дерева. Сырьем могут быть также и многие другие материалы: лигнин, битуминозные угли и скорлупа орехов. Промышленные активированные угли хорошего качества с очень большой эффективной поверхностью получают из скорлупы кокосовых орехов, обугленной при температуре около 1150°C и затем активированной путем обработки водяным паром.

Непременным условием эффективного использования угля в том или ином конкретном процессе является соответствие его качеств условиям данного процесса. Качество активированного угля в общем случае определяется характером его пористой структуры и природой поверхности. В случае очистки газообразных смесей от благородных газов, криптона и ксенона, адсорбция которых обязана проявлению чисто физических сил, и прежде всего дисперсионных, фактором, определяющим процесс, будет именно пористая структура сорбента. В адсорбции благородных газов основную роль играют микропоры.

Адсорбция инертных газов углеродным сорбентом обязана проявлению чисто физических сил.

Единственным методом очистки воздуха от радионуклидов йода является адсорбция, т.е. поглощение (адсорбирование) из потока воздуха на поверхности адсорбента молекул, атомов и ионов. В качестве адсорбента используется активированный уголь, обладающей исключительно развитой поверхностью и, следовательно, огромной поверхностью пор. Так, 1 г активированного угля имеет внутреннюю поверхность пор, достигающую $400...900\text{ м}^2$.

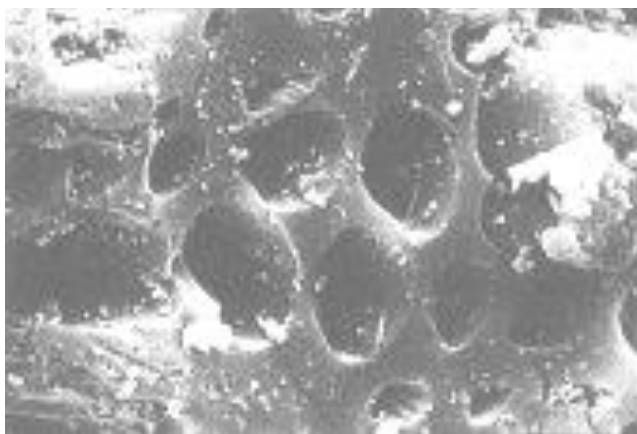


Рис. 2.11. Фотография пор угля

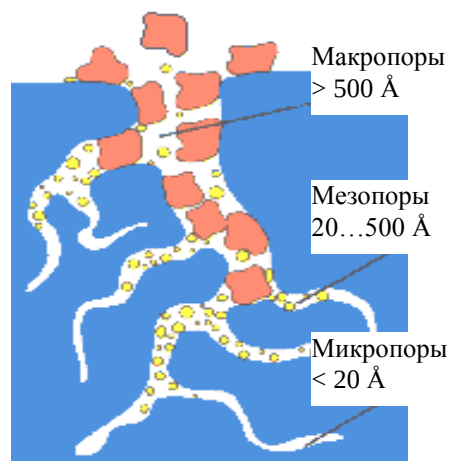


Рис. 2.12. Структура пор угля

Для очистки воздуха от йода серийно выпускаются следующие марки активированного угля:

- СКТ–3 (неимпрегнированный);
- СКТ–3И (может изготавливаться в 2 вариантах):
- с импрегнированием 1%-го йодистого калия или азотнокислого серебра с меньшей динамической емкостью по йоду;
- с импрегнированием 1%-го триэтилендиамина (ТЭДА), динамическая активность по йоду увеличена, но соединение очень летучее;
- СКТ–3ИК с импрегнированием сложным комплексом импрегнантов, в котором ТЭДА связан йодидом тяжелых металлов.

Свойства адсорбента определяются характером его пористой структуры, от которой зависят и характеристики адсорбционного равновесия, и массоперенос адсорбируемых молекул от внешней к внутренней поверхности. Основным работающим звеном при адсорбции газов в пористой системе углеродных сорбентов являются микропоры, а важнейшей ее характеристикой, определяющей адсорбционно–десорбционные свойства адсорбента, – распределение объема пор по их эквивалентным радиусам. Активированные угли характеризуются полидисперсной пористой структурой с таким распределением пор по размерам, когда кривая распределения имеет несколько узких максимумов. В отличие от полидисперсных систем, в которых более или менее равномерно представлены поры всех возможных размеров, активированные угли имеют поры с определенными интервалами размеров для каждой разновидности. В частности, для древесных углей кривая распределения объема пор по эффективным радиусам имеет три ярко выраженных максимума, приходящихся на 10, 100 и 10 000 Å и соответствующих микропорам, переходным порам и макропорам.

Сравнительные технические характеристики активированных углей приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Сравнительные технические характеристики углей активированных

Параметр и единица физической величины	Значение для марки угля		
	СКТ-3	СКТ-3И	СКТ-3ИК
Максимальная температура фильтруемого воздуха, °С	60		90 ¹
Максимальная относительная влажность фильтруемого воздуха, °С	70	90	98
Прочность при истирании, %	≥ 68	84	≥ 68
Время защитного действия по бензолу, мин	≥ 40	73	≥ 40
Динамическая активность по стабильному йоду, г/дм ³	≥ 10	27	≥ 10
Эффективность очистки по метилйодиду, %, не менее	до 80 ²	до 90 ²	99,0

Примечание: 1 – допускается эксплуатация при температуре до 120 °С в течение 48 ч и при температуре до 150 °С в течение 2 ч.

2 – в ТУ отсутствуют значения данного параметра, приводятся по оценке ФЭИ.

Характерной особенностью микропор, играющих определяющую роль в адсорбции инертных газов, является то, что по размерам они соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул.

Согласно современным представлениям, вытекающим из теории объемного заполнения, во всем объеме микропор существует адсорбционное поле, и основным параметром микропористой структуры является объем микропор. У активированных углей их объем обычно 0,2...0,6 см³/г.

Особенностью адсорбции инертных газов при низких концентрациях, соответствующих концентрации Kr и Xe в отходящих газах и газовых полостях реакторов, является то, что в этом процессе принимает преимущественное участие не весь объем микропор, а лишь небольшая его часть, соответствующая наиболее мелким микропорам с размером, близким к диаметрам сорбируемых молекул.

Угли промышленного изготовления АГ, БАУ, КАД, СКТ отличаются друг от друга плотностью, объемами пор, размерами гранул, особенностями технологии изготовления и, как следствие, коэффициентами адсорбции Kr и Xe, сорбционными свойствами по отношению к парам воды и другим примесям.

При выборе сорбента часто используют общие характеристики: объем пор и распределение их по размерам, удельную поверхность, особенно в тех случаях, когда трудно измерить сорбционную способность по отношению к сорбируемому компоненту.

Единственным материалом в группе неполярных твердых веществ, имеющих промышленное значение, является уголь, состоящий в основном из нейтральных атомов одного вида и имеющий поверхность с равномерным распределением зарядов на молекулярном уровне. На такой

поверхности не наблюдается преимущественная фиксация полярных молекул по сравнению с неполярными.

Для очистки отходящих газов АЭС с водо-водяными реакторами, составляющие основу атомной энергетики в РФ и за рубежом, широко используют адсорбционный метод очистки, в частности способ динамической адсорбции радионуклидов криптона и ксенона в колонне, работающей в режиме непрерывного потока. Такие системы наиболее просты в техническом отношении и достаточно эффективны. Проточная колонна обеспечивает очистку в $10^2 - 10^4$ раз, что позволяет поддерживать активность газовых выбросов АЭС значительно ниже норм, установленных санитарными правилами.

Угли давно и широко используются в различных областях хозяйства. Свойства адсорбента определяются характером его пористой структуры, и влияющие на адсорбционное равновесие и массоперенос адсорбируемых молекул от внешней к внутренней поверхности. Основным работающим звеном при адсорбции газов в пористой системе углеродных сорбентов являются микропоры, а важнейшей ее характеристикой, является распределение объема пор по их эквивалентным радиусам.

Активированные угли характеризуются полидисперсной пористой структурой с распределением пор по их размерам. Характерной особенностью микропор, является их соизмеримость с размерами адсорбируемых молекул. Во всем объеме микропор существует адсорбционное поле, и основным параметром микропористой структуры является объем микропор. У активированных углей их объем обычно $0,2...0,6 \text{ см}^3/\text{г}$.

Адсорбция инертных газов при низких концентрациях, соответствующих концентрации Kr и Xe в отходящих газах, является то, что в этом процессе принимает преимущественное участие лишь небольшая часть наиболее мелких микропор близких к диаметру сорбируемых молекул.

Наиболее известны типы активированных углей АГ, БАУ, КАД, СКТ и др. Для использования в системах газоочистки применяется серия торфяных углей сернисто-калиевой активации СКТ. Данные табл. 2.5 характеризуют их сорбционные свойства. Угли отличаются друг от друга плотностью, объемами пор, размерами гранул, особенностями технологии изготовления и, как следствие, коэффициентами адсорбции Kr и Xe, сорбционными свойствами по отношению к парам воды и другим примесям.

При выборе сорбента часто используют общие характеристики: объем пор и распределение их по размерам, удельную поверхность, особенно в тех случаях, когда трудно измерить сорбционную способность по отношению к сорбируемому компоненту.

Таблица 2.5 – Коэффициенты адсорбции Кг и Хе углями см /г [8]

Уголь	Криптон		Ксенон	
	303 К	243 К	303 К	243 К
СКИ–1, СКТ –2, СКТ –3, СКТ –4, СКТ –6 СКТ–М	47...55	120...220	640...910	5600...7000
СКТ, опытно-промышленный	80	430	1100	7000
Древесные, торфяные, каменно-угольные,	30...40	150...200	400...1000	5000...6000
Columbia-G	45...50	150	1100...1500	9000
ART–2, СКТ–1А, СКТ –1Б, СКТ –2А, СКТ –2Б, СКТ –3, СКТ –4А, СКТ –6А	60...65	190...280	620...1000	5800...8000

Примечание. Среда – воздух; угли тонкопористые; парциальные давления Кг и Хе соответствуют атмосферному.

Коэффициенты адсорбции более высоки для углей СКТ–2 и СКТ–3. На сорбционную способность углеродного сорбента значительно влияет газ–носитель (иногда говорят газ–макрокомпонент), особенно в том случае, когда сам газ–носитель хорошо сорбируется.

С понижением температуры на углях сорбируется все большее количество воздуха, который снижает сорбционную способность по отношению к Кг, Хе и Аг.

Промышленные партии угля имеют влажность около 1 % (по массе). Сушка угля в условиях промышленного использования может быть сделана лишь путем прокачки воздуха, осушенного до концентрации влаги в нем 1...100 мг/м³ (цеолитом либо вымораживателем), а также в лучшем случае дополнительного прогрева угля до температуры 373...383 К. После такой обработки в угле остается около 10 мг воды на 1 г угля (1 % по массе).

Влияние сопутствующих примесей. Факторы, влияющие на сорбционные свойства цеолитов. У цеолитов различных структурных типов определяющим для сорбции молекул Н₂О, NH₃, СО₂ имеют не структурные особенности решетки, а катионная плотность. Специфические взаимодействия аммиака и воды происходит в основном в результате взаимодействия свободных электронных пар азота и кислорода с катионами поверхности. Поэтому, значительно большая сорбция полярных молекул на цеолитах, чем на неспецифических сорбентах.

Процесс протекания сорбции аммиака на цеолите протекает сравнительно долго и заканчивается за 14 – 18 ч, хотя основная часть сорбционной емкости заполняется за 2–3 ч.

Факторы, влияющие на сорбционные свойства активированного угля. Некоторые примеси, содержащиеся в отходящих или технологических газах, непосредственно влияют на эффективность работы угольной

колонны. В основном состав примесей зависит от используемого теплоносителя: для реакторов – с водой под давлением – это пары воды, для кипящих реакторов – пары воды и аммиака, для реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем – окислы натрия, для реакторов с органическим теплоносителем – пары органических веществ и т.д. Вода, аммиак, углекислота, органические вещества при достижении определенных концентраций "отравляют" уголь, что приводит к снижению его сорбционных качеств.

Влияние аммиака. Изотермы адсорбции аммиака на активированном угле имеют выпуклую форму. В исследованных интервалах температуры от 313 до 245К и концентрации аммиака в потоке от 0 до 100 мг/г коэффициент адсорбции аммиака углем относительно небольшой. Например, сорбционная емкость угля даже для температуры, близкой к температуре конденсации аммиака, составляет 4...10 % при концентрации сорбата в потоке от 10 до 100 мг/л.

На адсорбцию Хе аммиак влияет в меньшей степени, чем на адсорбцию Кг. Это следует из данных о совместной сорбции инертных газов с аммиаком, полученных в статических условиях опыта в лабораторной рециркуляционной установке. Указанное различие проявляется в большей степени при более высоких концентрациях сорбата и более низкой температуре угля. Вероятно, NH_3 , экранируя часть устьев микропор, препятствует проникновению в них молекул Хе. В связи с этим адсорбция Хе происходит в более крупных микропорах. На поглощение Кг, молекулы которого обладают меньшими размерами, некоторое сужение диаметра входных отверстий не оказывает заметного влияния. На активированный характер диффузии указывает и тот факт, что установление сорбционного равновесия по обоим благородным газам (особенно для Кг в присутствии NH_3) происходит гораздо медленнее, чем при их поглощении из тока сухого воздуха.

Небольшие концентрации аммиака (до 25 мг/л), особенно при положительных температурах, не оказывают существенного влияния на адсорбционные свойства угля по отношению к благородным газам. Однако при повышении содержания NH_3 в потоке и понижении температуры угля влияние сорбата становится более заметным, особенно для ксенона. Одно и то же количество адсорбированного NH_3 оказывает наибольшее влияние на равновесные коэффициенты адсорбции благородных газов при положительных температурах и в гораздо меньшей степени – при отрицательных. Так, при 40 °С поглощение 18 мг сорбата на 1 г угля уменьшает адсорбцию Кг на 34 %, а Хе – почти в 2 раза. В то же время при – 20 °С для такого же снижения сорбционной емкости угля СКТ–М по обоим благородным газам адсорбция аммиака должна составлять более 50 мг/г.

До области резкого подъема изотермы происходит мономолекулярная адсорбция паров воды. Возможно образование конденсированной

адсорбционной пленки, создающей условия смачивания и заполнение микропор угля в результате капиллярной конденсации. Микропоры заполняются последовательно, начиная с самых малых.

Для улучшения сорбции желательно знать концентрацию примеси в потоке газа, однако в практике эксплуатации систем очистки на АЭС, измерение примеси в сорбенте невозможно, т.к. обычно система работает длительно и между газом и сорбентом устанавливается стационарное распределение отравляющей примеси.

Рассматривая влияния влаги на адсорбционные свойства угля по отношению к Кг и Хе, используется зависимость коэффициентов адсорбции от концентрации паров воды в газовой фазе.

2.2.3. Средства очистки радиоактивных газов и аэрозолей

Средства очистки воздуха от аэрозолей. Очистка воздуха тонковолокнистыми фильтрами от аэрозолей происходит в результате их инерционного осаждения на волокнах (крупные аэрозоли), электростатического осаждения, а также за счет прилипания частиц в поверхностном слое фильтра (когда диаметр аэрозолей больше расстояния между волокнами фильтра).

Для очистки сухого воздуха применяют фильтры, снаряженные различными фильтрующими материалами: ультратонким стекловолокном, синтетическими материалами, тканями и т.д. Особенно широкое применение нашли фильтры с тканью ФПП, представляющей собой слой ультратонких волокон перхлорвинила, нанесенных на марлевую подложку.

Ткани ФПП гидрофобны (не смачиваются водой); их применяют при температуре не выше 60 °С. Средний диаметр волокон у ткани ФПП – 1,5 и 2,5 мкм. Ткань маркируется в зависимости от диаметра волокон: ФПП–15 и ФПП–25 (цифра, стоящая после названия ткани, показывает диаметр волокон в микрометрах, условно увеличенный в 10 раз), вторая цифра в обозначении марки ткани – сопротивление, кгс/м².

Фильтрующий материал ФПП имеет высокий коэффициент очистки, проскок частиц стандартного масляного тумана через него при испытаниях на стенде менее 0,001. Однако высокие показатели фильтрации в значительной мере определяются тем, что в процессе изготовления волокна фильтра приобретают электрические заряды. При длительном хранении, сжатии, прессовании, в условиях повышенной влажности, при наличии ионизирующих излучений, в частности радионуклидов заряды на волокнах рекомбинируют или стекают, при этом фильтры теряют эффективность.

Ткань ФПП представляет собой слой ультратонких (1,5...2,5 мкм) волокон перхлорвинила, нанесенных на подкладку из марли. Она гидрофобна, стойка по отношению к кислотам и щелочам, но подвержена воздействию масел и органических растворителей. Эту ткань возможно

применять при $T < 333 \text{ К}$. Ткань ФПА готовится из ультратонких (примерно 1,5 мкм) волокон диацетатцеллюлозы. Она гидрофильна, поэтому фильтры могут применяться при относительной влажности воздуха не более 80 % и при $T < 423 \text{ К}$. Ткань ФПА стойка по отношению к маслам, но разрушается кислотами и щелочами. В зависимости от диаметра волокон ткани маркируют: ФПП–15, ФПП–25 и ФПА–15 (цифра, стоящая после названия ткани, показывает диаметр волокон в микронах, условно увеличенный в 10 раз). Фильтры с указанными типами тканей имеют эффективность очистки не ниже 99,9 %, способны при этом выдерживать удельную нагрузку очищаемого воздуха до $150 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (табл. 2.6) [5]. Под коэффициентом очистки η фильтрующей ткани, фильтра и всей установки в целом понимают отношение количества уловленного на фильтре вещества $m_{\text{ул}}$ к количеству этого же вещества, поступившего на фильтр $m_{\text{об}}$.

Таблица 2.6 – Коэффициент проскока фильтрующих материалов

Марка ткани	Полимерная	q, %	Марка ткани	Полимерная	q, %
ФПП–15–14,7	0,2	0,100	ФПП–25–29,4	0,4	0,010
ФПП–15–29,4	0,4	0,010	ФПП–25–58,8	0,8	0,005
ФПП–15–44,1	0,6	0,005	ФПА–15–39,2	0,6	0,050
ФПП–15–58,8	0,8	0,005	ФПА–15–58,8	0,8	0,005

Примечания. 1. Второе число в обозначении марки ткани – сопротивление, Па.

2. Коэффициент проскока Q приведен для случая испытаний на масляном тумане при удельных нагрузках $36 \dots 50 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м})$.

$$\eta = \frac{m_{\text{ул}}}{m_{\text{об}}} \cdot 100\% . \quad (2.13)$$

Для сравнительной оценки качества различных фильтрующих материалов и всей установки в целом более наглядно пользоваться коэффициентом проскока q:

$$q = 100 - \eta \text{ \%} . \quad (2.14)$$

Основными областями применения фильтров Петрянова (ФП) являются:

- очистка газов от твердых высокодисперсных аэрозольных частиц в режиме накопления сухого осадка;
- очистка технологических и промышленных вентиляционных газовых выбросов, содержащих радиоактивные или токсические аэрозоли;
- очистка вентиляционных выбросов камер, боксов, вытяжных шкафов и т.п.;
- тонкая очистка приточного атмосферного воздуха, очистка воздуха в системах кондиционирования и рециркуляционного обеспыливания;
- бактериальная очистка (стерилизация) воздуха;

- очистка воздуха в системах «дыхания» резервуаров для хранения жидких продуктов;
- улавливание малых масс дорогостоящих веществ на вытяжных системах;
- окончательная очистка воздуха и других газов, используемых в технологических процессах.

Благодаря малой толщине слоев материалов ФП (0,2...1 мм) фильтрующие аппараты с их применением очень компактны и в 1 м³ фильтра размещается поверхность фильтрации 100...150 м². Наибольшее распространение получили перхлорвиниловые волокна, обладающие высокой химической стойкостью, но их термостойкость невелика (60...70 °С). У ацетатных волокон химическая стойкость ниже, но термостойкость достигает 150 °С. Наиболее распространены фильтры с материалами ФП рамочной конструкции, материалы в виде ленты укладывают между П-образными рамками. Стороны этих рамок поочередно открыты и закрыты. Между соседними слоями материала установлены гофрированные разделители. Материалами, из которых изготовлены элементы фильтра, могут быть фанера, винипласт, алюминий, нержавеющая сталь.

Загрязненный воздух поступает через открытые стороны рамок, проходит через материал и выходит с противоположной стороны. Эффективность фильтров тонкой очистки проверяют на заводе-изготовителе по стандартному масляному туману (СМТ) или другому аэрозолю. Во избежание частой замены тонковолокнистых фильтров входная запыленность загрязненного воздуха не должна превышать 0,5 мг/м³. При более высокой запыленности целесообразно в фильтрах с материалами ФП предусматривать предварительную ступень – фильтры грубой очистки. В аппаратах малой производительности в одном и том же корпусе размещают фильтры тонкой очистки из материала ФП и грубой очистки в виде набивного слоя из волокна лавсан толщиной 5...10 см. Эти фильтры называют двухступенчатыми или комбинированным и обозначают ДК (деревянные комбинированные). Фильтры грубой или предварительной очистки (грубоволокнистые) обладают низким начальным гидравлическим сопротивлением (100...200 Па) и высокой пылеемкостью. Они значительно дешевле фильтров тонкой очистки, их можно легко заменять или регенерировать. При входной концентрации от 0,5 до 1 мг/м³ смену или регенерацию фильтрующего материала грубой очистки производят до шести раз в год. В России фильтры предварительной очистки марки ДСВ выпускают с набивкой грубым лавсановым волокном диаметром от 15 до 25 мкм; плотность набивки 15...25 кг/м³; толщина слоя 0,10 м. Техническая характеристика фильтра: производительность 600 м³/ч; эффективность очистки воздуха 80...90 %; скорость фильтрации 15 м/мин.

В процессе эксплуатации на фильтрующей ткани накапливаются осадок и обычная пыль, присутствующая в воздухе помещений (около $0,5 \text{ мг/м}^3$). Из-за этого растет сопротивление фильтра, а пропускная способность фильтров и вентиляционной системы падает. Поэтому при подборе вентилятора учитывают не первоначальные сопротивления чистых фильтров, а конечные, за которые принимают удвоенные первоначальные.

В последнее время для тонкой очистки воздуха применяют фильтрующие материалы: картон марки ФМП-2 (фильтрующий материал промышленный), изготовленный на асбестоцеллюлозной основе; маты и картон из ультратонкого стекловолокна. ФМП-2 имеет более низкую (по сравнению с тканью ФПП) стоимость; стекловолокно – стойкость против воздействия органических растворителей и высокую температуростойчивость (до $573 \dots 673 \text{ К}$).

Фильтры тонкой очистки работают нормально, если в очищаемом воздухе находится сравнительно небольшое массовое количество частиц. Особенно неблагоприятно отражается на работе фильтров наличие в воздухе паров различных химических соединений. Чтобы обеспечить нормальные условия работы фильтров тонкой очистки и увеличить срок их службы, предусматривают предварительную очистку воздуха на фильтрах грубой очистки. Они в качестве фильтрующего материала используют различные волокнистые (стекловолокно, отходы волокна лавсана, пропиленовое волокно и т.д.) и зернистые материалы (песок, опилки, крошку из резины и винипласта и другие материалы). Фильтры тонкой и грубой очистки при малых объемах воздуха размещают в одном корпусе. В этом случае их называют двухступенчатыми или комбинированными.

Из таких фильтров наибольшее распространение получили ДК–0,11; ДК–0,4; ДК–0,6; ДК–1,4 и ДК–4,5; число соответствует фильтрующей поверхности фильтра в квадратных метрах. Зернистые фильтры могут быть самой разнообразной конструкции и иметь фильтрующие поверхности до нескольких сот квадратных метров. Их применяют при значительных начальных концентрациях аэрозолей в очищаемом воздухе.

Коэффициенты очистки волокнистых и зернистых фильтров обычно не приводят. Да в этом и нет необходимости, так как конечную степень очистки определяют в основном фильтры второй ступени. Коэффициент очистки фильтров первой ступени зависит от скорости воздуха (чем выше скорость, тем меньше коэффициент очистки), от плотности набивки и высоты слоя (чем больше плотность и высота слоя, тем выше коэффициент очистки) и от физических свойств и дисперсности аэрозолей.

Для фильтрации жидких аэрозолей используют стекловолокнистые самоочищающиеся фильтры тонкой очистки типа "Фартос" с коэффициентом очистки до 10^3 . Непрерывный отвод жидкости

обеспечивает большой срок службы этих фильтров. Их выпускают различных типоразмеров, производительность достигает $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ в одном агрегате. В некоторых случаях их можно использовать и для фильтрации твердых частиц.

Рациональный выбор фильтров и схем фильтровальных установок различных вентиляционных систем позволяет обеспечить надежную очистку выбрасываемого воздуха и исключить загрязнение окружающей среды вентиляционными выбросами АЭС.

Когда угольная колонка работает до проскока радионуклидов (ГПД или йода), тритий она не удерживает, поскольку водород, как и гелий, часто используется как газ-носитель, поэтому наиболее слабо адсорбируется углем. Лучше, но тоже слабо адсорбируются основные компоненты воздуха: азот и кислород. Радионуклид N в зависимости от технологических параметров системы будет удерживаться единицы – десятки минут, что так же незначительно снизит его концентрацию.

Режим работы до проскока используется или разрабатывается преимущественно для очистки газовых полостей водо-водяных реакторов под давлением. На зарубежных АЭС криогенные угольные системы очистки обеспечивают очистку газообразных отходов на реакторах типа ВВЭР от радиоактивных продуктов. В них рабочий цикл угольной колонны прекращается перед проскоком ^{85}Kr .

Применение систем с высокой эффективностью очистки должны поддерживаться максимально герметичной работой всех системы станции (основных и вспомогательных), полностью исключающей неорганизованные протечки газа и теплоносителя в помещения, чтобы не допустить выброса радиоактивных газов с вентиляционным воздухом. Это сложная техническая задача.

Режим рециркуляции очищаемого газа через уголь используют для очистки замкнутого газового объема. Тритий в основном удаляется системой очистки, если для осушки газового потока, поступающего на уголь, используется конденсационный метод. Для йода и его соединений оптимальная емкость угольной колонны, рассчитанная для задержки радионуклидов ГПД, велика. Радиоактивный ^{131}I практически полностью удаляется такой системой.

Вентиляция должна обеспечить нормальные санитарно-гигиенические и безопасные условия работы персонала. Главная ее задача – поддержание в воздухе производственных помещений концентраций радиоактивных примесей менее предельно допустимых. Основные требования к вентиляции – высокая эффективность и надежность.

При проектировании АЭС предусматривают принцип раздельного вентилирования помещений зоны строгого и свободного режима. В зоне строгого режима не допускается объединение воздуховодами

вентиляционных систем необслуживаемых, периодически обслуживаемых и помещений постоянного пребывания персонала.

Вентилирование производственных помещений зоны строгого режима при нормальных и аварийных условиях организуют таким образом, чтобы обеспечить направленность движения воздушных потоков только в сторону более грязных помещений. С этой целью в необслуживаемых и периодически обслуживаемых помещениях системой вытяжной вентиляции должно обеспечиваться разрежение. Его значение не менее 196 Па для помещений, рассчитанных на давление, и не менее 49 МПа для помещений, не рассчитанных на давление.

Санитарные правила ОСПОРБ–2010 требуют, чтобы на АЭС предусматривали системы очистки вентиляционного выбросного воздуха от радиоактивных аэрозолей и парообразных соединений йода. Степень очистки вентиляционного воздуха и технологических сдувок должна быть такой, чтобы выброс радиоактивных газов и аэрозолей не превышал установленных значений. Во всех случаях воздух из помещений зоны строгого режима должен выбрасываться во внешнюю среду через вентиляционную трубу высотой 100 – 150 м. Расходы вентиляционного воздуха, подлежащего очистке, достигают для блока мощностью 1000 МВт сотен тысяч кубометров в час. Очистка таких объемов воздуха от ИРГ экономически нецелесообразна и, как правило, в ней нет необходимости, так как их количество не превышает допустимого СП АЭС. Вместе с тем, требуется очистка вентиляционного воздуха АЭС от аэрозолей, хотя массовая концентрация аэрозолей в этих случаях низка. Поэтому, хотя методы, применяемые для очистки воздуха от радиоактивных аэрозолей, сходны с обычными методами очистки газов от пыли, для этого требуются другие технические решения, другие материалы и оборудование.

Для очистки воздуха помещений АЭС применяют вентиляционные системы двух типов: рециркуляционные (замкнутые) и прямоточные. В рециркуляционных системах очищенный фильтрами воздух вновь поступает в герметичные помещения, уменьшая тем самым концентрацию радиоактивных продуктов в атмосфере рабочих помещений. К материалу фильтров этих систем предъявляются жесткие требования. Они должны выдерживать температуру до 373 К и выше и работать при относительной влажности воздуха до 100 %. Обычно коэффициент очистки воздуха рециркуляционными системами невелик (20–30). Большой эффект достигается не в результате увеличения коэффициента очистки, а за счет увеличения количества (доли) очищаемого воздуха.

В помещениях зоны строгого режима, в которых предполагается постоянное или периодическое пребывание персонала, рециркуляционные системы использовать запрещено.

В прямоточной системе вентиляции очищенный воздух выбрасывается прямо через вентиляционную трубу в атмосферу с соблюдением нормативов по выбросу радиоактивных веществ. В этой системе фильтры выбираются с максимально возможным коэффициентом улавливания аэрозолей.

Очистка вентиляционного воздуха от йода в тех системах, где это требуется, производится с помощью фильтров, заполненных слоем активированного угля, который пропитывают специальными веществами (например, AgNO_3 , Pb_2 , KI , CuI , триэтилендиамин), повышающими эффективность улавливания йода и его соединений. Для этих целей используют йодные фильтры различных типоразмеров с импрегнированными и неимпрегнированными углями.

Классификация фильтров. В настоящее время все производители фильтров и фильтрующих материалов применяют их классификацию согласно современным европейским стандартам EN 779 и EN 1822. Стандарт EN 779 классифицирует характеристики фильтров по средней эффективности очистки воздуха от частиц размером 0,4 мкм. Стандарт EN 1822 классифицирует высокоэффективные фильтры – фильтры HEPA и ULPA.

По указанным стандартам все фильтры делятся на 17 классов:

- фильтры грубой очистки – классы G1...G4;
- фильтры тонкой очистки – классы F5...F9;
- фильтры высокой эффективности (HEPA) – классы H10...H14;
- фильтры сверхвысокой эффективности (ULPA) – классы U15...U17.

Фильтры грубой очистки. Фильтры ячейковые унифицированные $\Phi_{\text{я}}$ предназначены для очистки приточного воздуха от пыли, они могут устанавливаться индивидуально или объединяться в прямые или V-образные панели.

Фильтры $\Phi_{\text{я}}$ имеют одинаковые размеры, состоят из ячейки и установочной рамы. В корпусе ячейки уложен фильтрующий слой (материал). Ячейка фильтра закрепляется в установочной раме с помощью четырех защелок, расположенных на корпусе ячейки. Перед монтажом ячейка фильтра извлекается из установочной рамы. После установки рамы ячейка фильтра помещается в нее и закрепляется защелками.

Технические характеристики фильтров ячейковых $\Phi_{\text{я}}$ приведены в табл. 2.7. Фильтры работоспособны и сохраняют технические характеристики при температуре очищаемого воздуха от минус 40 до плюс 40 °С. Фильтры ячейковые $\Phi_{\text{яР}}$ и $\Phi_{\text{яВ}}$ могут использоваться в сухом и смоченном маслом



Рис. 2.13. Фильтр ячейковый $\Phi_{\text{я}}$

состоянии. Окружающая среда и фильтруемый воздух не должны содержать агрессивных газов и паров. При достижении заданного перепада давления воздуха фильтры необходимо подвергнуть регенерации.

Таблица 2.7 – Технические характеристики фильтров ячейковых

Параметр и единица физической величины	Марка фильтра			
	Ф _{яР}	Ф _{яВ}	Ф _{яП}	Ф _{яУ}
Фильтрующий материал	Стальная сетка	Сетка из винипласта	Пенополиуретан	Стекловолокну ФСВУ
Площадь рабочего сечения, м ²	0,22			
Пропускная способность, м ³ /ч	1 540			
Начальное сопротивление фильтра, Па	50	60	60	40
Пылеемкость, г/м ²	2 300	2 200	350	570
Эффективность очистки, %	80±5			
Вес, кг	6	4,2	3,4	3,0

Для регенерации фильтров необходимо извлечь ячейки из установочных рам. Ячейки фильтров Ф_{яВ}, Ф_{яР}, Ф_{яП} промывают теплой водой с добавлением поверхностно-активных веществ. Фильтрующий материал фильтров Ф_{яУ} заменяется новым.

Рулонные фильтры ФРП (рис. 2.14) представляют собой коробчатый каркас, имеющий в верхней и нижней частях катушки-барабаны. На верхнюю катушку наматывается фильтрующий материал ФРНК–ППГ или ФСВУ в виде рулона, полотнище которого закрепляется на нижней катушке. Воздух, проходя через полотнище рулона, очищается. По мере накопления в фильтрующем материале пыли его сопротивление возрастает. При достижении расчетного сопротивления фильтрующий материал перематывается с нижнего барабана на верхний и заменяется новым.



Рис. 2.14. Фильтрующий материал ФРНК–ППГ в рулоне

При стирке, глажении и сушке спецодежды в местные отсосы от технологического оборудования попадают хлопчатобумажные и синтетические волокна, которые затем наматываются на рабочие колеса вентиляторов, оси обратных клапанов, при этом нарушается работа систем вентиляции и создается опасность пожара. Для предотвращения этого в непосредственной близости к технологическому оборудованию

устанавливаются сетчатые фильтры с размером ячейки 1...2 мм. Конструкция их зависит от местных условий, как правило, сетки выполняются съемные для возможности периодической очистки воздуха их от волокон.

Фильтры тонкой очистки карманные. Воздушные фильтры карманного типа (рис. 2.15) класса F5...F9 предназначены для очистки воздуха от пыли в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха. Фильтр состоит из металлической рамки и фильтрующего материала, сшитого в виде карманов.

Рамка фильтра выполнена из оцинкованной стали, карманы фильтра закреплены механически, швы карманов термически спаяны. Держатели зазоров препятствуют сильному раздуванию и слипанию смежных карманов фильтра, обеспечивая равномерный зазор между стенками карманов как внутри них, так и снаружи.



Рис. 2.15. Фильтр карманный

Фильтр ФИБАН–500 (рис. 2.16) предназначен для очистки газа от радионуклидов ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{60}Co . Фильтр ФИБАН–500 устанавливается в камеру фильтра фильтровальной станции хранилища контейнерного типа отработанного ядерного топлива. Рабочая среда – газозооные технологические сбросы, содержащие твердые и жидкие высокодисперсные аэрозольные частицы, прошедшие через конденсатор и фильтр ФАРТОС–500.

Фильтры аэрозольные. Фильтры аэрозольные с клиновыми сепараторами. Наиболее распространенный на аэрозольный фильтр Д–23 кл (Ф–23) (рис. 2.17) представляет собой набор цельноштампованных рамок–сепараторов из винипластовой пленки клиновидной формы переменного сечения, между которыми укладывается фильтрующий материал ФПП площадью 23 м².

Таблица 2.8 –Технические характеристики

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная производительность, м ³ /ч	90
Эффективность очистки по всем нуклидам, %	90
Абсолютное рабочее давление в корпусе камеры, Па, до	85
Температура очищаемого газа, °С, до:	90
Относительная влажность очищаемого воздуха, %, до	80
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	
– первой ступени, предназначенной для очистки газа от ^{137}Cs , ^{134}Cs , м ²	0,9
– первой ступени, предназначенной для очистки газа от ^{154}Eu , м ²	1,1
– первой ступени, предназначенной для очистки газа от ^{60}Co , м ²	1,3
Габаритные размеры наибольшие Ø×h, мм	635×850
Масса фильтра, кг	115



Рис. 2.16. Фильтр
ФИБАН-500



Рис. 2.17. Фильтр аэрозольный
Ф-23 и корпус Ду350

Клиновидные сепараторы устроены так, что высота входных каналов по мере уменьшения количества, проходящего через них воздуха понижается, а высота выходных каналов повышается. При сравнительно небольших габаритах этот фильтр обладает высокой производительностью.

Корпус фильтра изготовлен из дерева, сепараторы и рамки фильтрующих элементов типа А изготавливают из алюминия. Фильтры аэрозольные применяют для индивидуальной установки (в металлический корпус Ду350, см. рис. 2.12) и групповой установки (в подъемно-прижимное устройство). Особое внимание следует обращать на герметичность между тканью и конструктивными элементами, наличие даже небольших неплотностей резко увеличивает коэффициент проскока аэрозолей. Требование тщательной герметизации предъявляется также и к сборке фильтров при групповой установке. Технические характеристики аэрозольных фильтров Д-23кл (Ф-23), А-17 приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9 – Технические характеристики аэрозольных фильтров типа А и Д

Параметр и единица физической величины	Значение для типов		
	А-17	Д-23 кл (Ф-23)	Д-33 кл
1	2	3	4
Производительность, м ³ /ч	2 500	3 000	5 000
Начальное аэродинамическое сопротивление, Па	600		
Фильтрующий материал	Ткань Петрянова ФПП-15		
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	17	23	33
Эффективность очистки, %	99,95		
Удельная пылеемкость, кг/м ³	0,06		
Относительная влажность фильтруемого воздуха, %	не более 60		
Термостойкость, °С	95		
Горючесть	Горюч с выделением токсичных веществ		
Материал корпуса	Фанера		
Оцениваемый ресурс, лет	1		

Примечание. Эффективность очистки приведена в исходном состоянии, она имеет значение не более 90 % при 100 % относительной влажности, повышенных температурах, длительном хранении из-за потери части электростатического заряда ткани Петрянова.

Фильтры аэрозольные ФРА–95–10М предназначены для очистки влажного воздуха. Конструктивно фильтр выполнен в виде модуля, вход воздуха организован сверху, выход – вниз в коллектор. В качестве фильтрующего материала используются маты фильтровальные из ультратонкого стекловолокна толщиной 10 мм, армированные с обеих сторон кремнеземной сеткой. Сепараторы изготовлены из алюминия. Технические характеристики фильтра ФРА–95–10М приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10 – Технические характеристики фильтра ФРА–95–10М

Параметр и единица физической величины	Значение
Давление в помещении, МПа	0,065...0,17
Рабочая температура, °С	не более 90
Аэродинамическое сопротивление, Па	500
Площадь фильтрации одного модуля, м ²	47,5
Производительность, м ³ /ч	10 000
Фильтрующий материал	Стекловолокно М20–УТВ/0,65–65
Скорость фильтрации, см/с	3

Фильтры ФАРТОС (фильтры аэрозольные, регенерирующиеся для тонкой очистки, стекловолокнистые) предназначены для тонкой очистки воздуха и различных газов, образующихся при диспергировании солевых растворов, кислот и органических веществ.

Фильтры аэрозольные ФАРТОС могут работать:

- в режиме накопления сухого остатка с последующей многократной регенерацией фильтрующего слоя методом промывки;
- в режиме самоочищения, т.е. при фильтрации тумана с непрерывным удалением уловленной жидкой дисперсной фазы из фильтрующего слоя. Удаление жидкости происходит естественным путем, без специального отсоса из фильтрующего слоя;
- в переменном режиме, т.е. с чередованием сухого и влажного режимов фильтрации.

По паспортным данным, коэффициент проскока фильтров ФАРТОС по масляному туману должен быть не более 0,05 %, что соответствует классу очистки H13. Технические характеристики фильтров ФАРТОС приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11 – Технические характеристики фильтров ФАРТОС

Параметр и единица физической величины	Значение для фильтров		
	ФАРТОС Ц-200	ФАРТОС Ц-500	ФАРТОС Ц-2500
Номинальная воздушная нагрузка, м ³ /ч	200	500	2 500
Аэродинамическое сопротивление сухого фильтра, Па	До 500		
Аэродинамическое сопротивление фильтра в режиме самоочищения, Па	До 3 000		
Коэффициент проскока по стандартному туману сухого фильтра, %	0,01		
То же в режиме самоочищения, %	0,1		
Рабочее давление, кПа	150		
Остаточный вакуум, кПа	20		
Рабочая температура, °С	До 100		

В качестве фильтрующего материала в фильтрах ФАРТОС используются маты из ультратонкого стекловолокна со средним диаметром волокон порядка 1 мкм. Фильтр работает следующим образом:

– при фильтрации в режиме самоочищения подлежащий очистке газ, содержащий капельки тумана, поступает на вход фильтра, очищается от дисперсной фазы и выходит очищенный через боковой патрубок. Уловленная жидкая фаза накапливается в фильтрующем слое, и при определенном насыщении последнего под действием потока газа и силы тяжести вытекает в нижнюю часть корпуса фильтра и удаляется через дренажный штуцер;

– при фильтрации сухих аэрозолей газ очищается на фильтре, а уловленная твердая дисперсная фаза накапливается на фильтрующем слое. При достижении перепада давления газа на фильтре, при котором дальнейшая его эксплуатация становится нецелесообразной, фильтр подвергается регенерации или производится замена фильтреlementa.

Регенерация может быть осуществлена путем подачи промывочной жидкости на фильтрующий слой.

Фильтр ФАРТОС-500 (рис. 2.18) предназначен для очистки от жидких и твердых мелкодисперсных радиоактивных и токсичных аэрозольных частиц технологического сдувочного воздуха из аппаратов перед выбросом в атмосферу. Рабочей средой являются газовоздушные технологические сбросы, прошедшие через фильтр ФСГО-500. Устанавливается в камеру в системах газоочистки.



Рис. 2.18. Фильтр ФАРТОС-500

Аэрозольный фильтр "ФАРТОС Ц-500С" предназначен для очистки воздуха от высокодисперсных жидких аэрозольных частиц,

растворов кислот, кроме HF и HCl , а также органических жидкостей и растворов щелочей.

Фильтр "ФАРТОС Ц-500С" может применяться:

- для очистки газов от твердых высокодисперсных аэрозольных частиц в режиме накопления сухого осадка;
- одновременного улавливания твердых и жидких высокодисперсных аэрозольных частиц.

Фильтр может применяться:

- в системах вентиляции и рециркуляции помещений;
- при проведении работ по дезактивации помещений и оборудования;
- при проведении ремонтных работ, связанных с выделением туманов радиоактивных или токсичных жидкостей.

Волокнистые фильтры представляют собой слои различной толщины, в которых более или менее однородно распределены волокна из соответствующего материала. Для улавливания частиц в фильтрах тонкой очистки широко применяют волокнистые фильтры в виде тонких листов или объемных слоев с фильтрующими материалами из тонких волокон (диаметр менее 5 мкм) при скорости фильтрации от 0,6 до 6 м/мин. Сопротивлении чистых (свежих) фильтров обычно не превышает 200–300 Па, а после длительного запыления 700–1500 Па.

Конструкция фильтра аэрозольного ФАРТОС Ц-500 показана на рис. 2.20, фильтр ФАРТОС Ц-2500 состоит из 5 фильтрэлементов и общего корпуса с дренажным штуцером.

Фильтр *ФАРТОС Б-250* (рис. 2.21) предназначен для очистки газов от высокодисперсных твердых и жидких аэрозолей (0,3...3 мкм), при этом фильтр обеспечивает ядерную безопасность сборки, т.е. защиту от самопроизвольной цепной реакции (СЦР) при аварийной ситуации, в процессе которой зазор между вставкой, поглощающей нейтроны, и стенкой корпуса заполняется пульпой, содержащей частицы делящегося вещества с произвольной концентрацией делящихся нуклидов.



Рис. 2.19. Корпус фильтра "ФАРТОС Ц-500С"

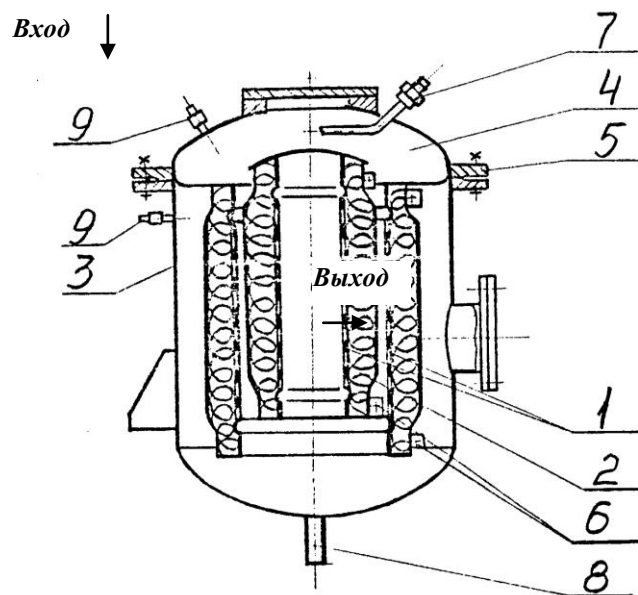


Рис. 2.20. Фильтр аэрозольный ФАРТОС Ц-500:
1 – цилиндр перфорированный;
2 – фильтрующий слой; 3 – корпус; 4 – крышка;
5 – болты; 6 – хомуты; 7 – устройство для промывки;
8 – дренажный штуцер; 9 – штуцера для измерения перепада давления на фильтре



Рис. 2.21. Корпус фильтра ФАРТОС Б-250

Фильтр по своему назначению относится к элементам нормальной эксплуатации, а по влиянию на безопасность – к элементам важным для безопасности. Рабочая среда – воздух, содержащий высокодисперсные аэрозольные частицы, в том числе и жидкие частицы, состоящие из воды, водных растворов солей и щелочей, водных растворов кислот, кроме HF и HCl, а также из органических жидкостей.

Конструкция фильтра предусматривает возможность периодической регенерации установленного в кожух фильтра путем заполнения корпуса кожуха промывочной жидкостью и последующего слива этой жидкости через соответствующие патрубки в корпусе кожуха с последующей сушкой фильтра продувкой через него воздуха.

Срок службы фильтра составляет 30 лет с периодической заменой фильтрующего элемента.

Технические характеристики аэрозольного фильтра ФВЭА-3500 приведены в табл. 2.13.

ФВЭА-3500 – высокоэффективный аэрозольный фильтр для очистки воздуха и технологических газов от радиоактивных и неактивных

аэрозолей. Изготовлен в корпусе из трудногорючей атмосферостойкой фанеры из высокотемпературных стекловолокнистых материалов.

Таблица 2.12 – Технические характеристики

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная производительность, м ³ /ч	250
Соппротивление потоку воздуха при номинальной производительности:	
– начальное, Па, не более	1200
– в стационарном режиме самоочищения, Па, не более	4000
Эффективность очистки воздуха по стационарному масляному туману (СМТ), %	99,9
Допустимая массовая концентрация аэрозольных частиц в очищаемом воздухе:	
– твердых, мг/м ³ , не более	0,1
– жидких, мг/м ³ , не более	500
Абсолютное рабочее давление в кожухе фильтра, МПа	0,08–0,15
Температура очищаемого воздуха, °С:	
– минимальное, не менее	5
– максимальное, не более	60
– при регенерации, не более	90
Относительная влажность очищаемого воздуха, %, до	100
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	1,6
Габаритные размеры наибольшие Ø × h, мм	540 × 1043
Масса фильтра, кг	150



Рис. 2.22. Фильтр ФВЭА–3500

Габаритные размеры и размеры присоединительных фланцев совпадают с размерами фильтров Д23, А–17 и др. и соответствуют установочным местам фильтровальных установок действующих АЭС.

Фильтры типа ФВЭА изготавливаются в двух конструктивных исполнениях:

- одноступенчатый, где фильтрующий материал имеет два слоя, первый по потоку фильтруемого воздуха слой – стекловолокнистый материал повышенной пылеемкости, второй – стеклобумага классов Н13 или Н13–Н14;

- двухступенчатый, где первая ступень предназначена для грубой (предварительной очистки) и выполнена из стекловолокнистого материала

повышенной пылеемкости, вторая ступень – предназначена для высокоэффективной (тонкой) очистки от аэрозолей и изготовлена из стеклотумаги классов H13 или H13–H14.

Таблица 2.13 – Технические характеристики аэрозольного фильтра ФВЭА–3500

Параметр и единица физической величины		Значение
Производительность, м ³ /ч		3 500
Аэродинамическое сопротивление, Па	начальное	300...350
	конечное	1 500
Эффективность очистки по радиоактивным и неактивным аэрозолям, %		99,95
Пылеемкость, кг		6...12
Влажность очищаемого воздуха, %		до 100
Рабочая температура, °С		минус 60...плюс 120
Работоспособность при температуре 150 °С и 100 % влажности, ч		24
Ресурс работы в условиях нормальной эксплуатации, лет		2
Масса, кг		28 (фанерный), 40 (металлический)

Аэрозольные фильтры ФВЭА–3500 применимы для вытяжной и приточной вентиляции. Габаритные размеры и размеры присоединительных фланцев фильтра соответствуют установочным местам фильтровальных ячеек, действующих АЭС.



Рис. 2.23. Фильтр ФСГО–500

Фильтры устанавливаются в стандартные кожухи ДУ–350, камеры, используются в качестве фильтровальных модулей фильтровальных установок.

Фильтр ФСГО–500 (рис. 2.23) предназначен для очистки от жидких и твердых мелкодисперсных радиоактивных и токсичных аэрозольных частиц технологического сдувочного воздуха из аппаратов перед выбросом в атмосферу. Рабочей средой являются газозодушные технологические сбросы.

Устанавливается в камеру или кожух в системах газоочистки перед фильтрами, предназначенными для очистки от высокодисперсных аэрозолей.

Фильтр ФСКО–1000 (рис. 2.24) предназначен для комплексной очистки воздуха от жидких и твердых крупных и высокодисперсных аэрозольных частиц, растворов кислот, кроме HF и HCl, а также органических жидкостей и растворов щелочей.

Фильтр ФСКО–1000 может применяться в системах вентиляции и рециркуляции помещений, в системах утилизации радиоактивных отходов, а также при проведении работ по дезактивации помещений и оборудования или ремонтных работ, связанных с выделением туманов радиоактивных или токсичных жидкостей. Устанавливается в кожух или камеру в системах газоочистки.



Рис. 2.24. Фильтр ФСКО–1000

Таблица 2.14 – Технические характеристики

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная производительность, м ³ /ч	500
Коэффициент проскока по очистке воздуха по стационарному масляному туману (СМТ), %	30
Абсолютное рабочее давление в кожухе фильтра, МПа	0,08–0,11
Температура очищаемого воздуха, °С:	
– минимальное, не менее	5
– максимальное, не более	90
– при регенерации, не более	90
Относительная влажность очищаемого воздуха, %, до	100
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	2,1–3,4
Габаритные размеры наибольшие О × h, мм	660 × 714
Масса фильтра, кг	115

В системах пассивной фильтрации технологических выбросов АЭС (СПОТ) применяется фильтр аэрозольный, предназначенный для очистки от радиоактивных аэрозолей при протечке парогазовой смеси в межоболочечное пространство из герметичной оболочки АЭС при запроектных авариях.

Фильтр состоит из корпуса фильтра и фильтрующего элемента аэрозольного, выполненного на основе стекловолоконных и углеволоконных фильтрующих материалов, обеспечивающего работоспособность и эффективную очистку парогазовой смеси.

ФАИ–3000 – универсальный аэрозольно-сорбирующий фильтр (рис. 2.27). Изготавливается в металлическом корпусе или в корпусе из трудногорючей фанеры, из высокотемпературных стекловолоконных и углеволоконных материалов с применением технологии введения в фильтроматериал высокоэффективных сорбентов радиоактивного йода.

Конструкция фильтра и применяемые материалы позволяют фильтру-адсорберу выполнять одновременно две функции: очистка воздуха от

активных и неактивных аэрозолей, сорбция молекулярного радиойода и его соединений.

Фильтрующий и сорбирующий материал состоит из 5-ти слоев: первым по направлению потока фильтруемого воздуха расположен стекловолокнистый материал с повышенными характеристиками по пылеемкости, вторым – слой углеволокнутого материала, 3 и 4 слоя содержат сорбент на основе высокодисперсного импрегнированного активированного угля для сорбции радиоактивного йода, 5 слой – высокоэффективная стеклобумага класса Н13 или Н13–Н14 для очистки от радиоактивных аэрозолей.

Таблица 2.15 –Технические характеристики ФСКО

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная производительность, м ³ /ч	1000
Сопротивление потоку воздуха при номинальной производительности	
– начальное, Па, не более	700
– в стационарном режиме самоочищения, Па, не более	3500
Эффективность очистки воздуха по стационарному масляному туману (СМТ), %	99,95
Температура очищаемого воздуха, °С, не более:	100
Относительная влажность очищаемого воздуха, %, до	100
Площадь фильтрующей поверхности, м ²	18,93
Габаритные размеры наибольшие Ø × h, мм	960×905
Масса фильтра, кг	200



Рис. 2.25. Корпус фильтра



Рис. 2.26. Фильтрующий элемент для аэрозолей

Таблица 2.16 – Технические характеристики СПОТ

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Номинальный расход фильтруемой среды, м ³ /ч	35
Размер частиц аэрозоля, мкм	0,1...2,0
Масса аэрозоля проходящая через фильтрующий элемент при аварии, г	154
Допустимая массовая концентрация аэрозольных частиц в очищаемом воздухе:	
Температура рабочей среды, °С:	
– при запроектной аварии, минимальная, не менее	15
– при запроектной аварии, максимальная, не более	280
Температура фильтрующего элемента на входе в фильтр, °С	15...150
Относительная влажность очищаемого воздуха в режиме ожидания, %, до	90
Относительная влажность очищаемого воздуха при запроектной аварии, %, до	98
Габаритные размеры (ширина, высота, длина), мм	636×608×572
Масса фильтрующего элемента, кг	51
Масса фильтра, кг	120

Универсальный аэрозольно-сорбирующий фильтр ФАИ–3000 имеет габаритные размеры и размеры присоединительных фланцев такие же, как у фильтров Д23кл, Ф–23, А17 и соответствуют установочным местам фильтровальных установок, действующих АЭС.

Фильтр предназначен для комплексной очистки воздуха от радиоактивных аэрозолей и радиоактивного йода и его соединений. Устанавливается вместо аэрозольного фильтра в тех спецвентиляциях АЭС, где проектом не предусмотрена установка фильтров–адсорберов радиоактивного йода, или в тех системах, где фильтры–адсорберы радиоактивного йода проработали в непрерывном режиме более 5-ти лет. Технические характеристики аэрозольно-сорбирующего фильтра ФАИ–3000 приведены в табл. 2.17.



Рис. 2.27. Фильтр ФАИ–3000

Адсорберы угольные (йодные фильтры) (рис. 2.28). Очистку воздуха от радиоактивного йода в отсутствие агрессивных газов производят в угольных адсорберах. При этом использован принцип «вечной колонны», который позволяет осуществить непрерывный процесс улавливания. Фильтр-адсорбер АУИ–1500 предназначен для улавливания радиоактивного йода и его соединений из газозоудных сбросов спецвентиляции атомных станций. Выпускается со сменным сорбирующим картриджем.

Таблица 2.17 – Технические характеристики фильтра ФАИ–3000

Параметр и единица физической величины		Значение
Производительность, м ³ /ч		3 000
Аэродинамическое сопротивление, Па	начальное, не более	800
	конечное	2 400
Эффективность очистки, %	по радиоактивным и неактивным аэрозолям	99,95
	по молекулярному радиойоду	99,0
	по органическим соединениям радиойода	90,0
Фильтрующая поверхность, м ²	36	Фильтрующая поверхность, м ²
Количество сорбента, кг	7,5	Количество сорбента, кг
Пылеемкость, кг, не менее	12	Пылеемкость, кг, не менее
Влажность очищаемого воздуха, %	до 90	Влажность очищаемого воздуха, %
Рабочая температура, °С	минус 60...плюс 120	Рабочая температура, °С
Работоспособность при температуре 150 °С и 100 % влажности, ч	24	Работоспособность при температуре 150 °С и 100 % влажности, ч
Ресурс работы в условиях нормальной эксплуатации, лет	2	Ресурс работы в условиях нормальной эксплуатации, лет
Масса, кг	38 (фанерный), 58 (металлический)	Масса, кг



Рис. 2.28. Адсорбер угольный АУ–1500 ВМ: 1 – адсорбент, 2 – входной патрубок; 3 – верхняя решетка; 4 – корпус; 5 – выходной патрубок; 6 – нижняя решетка



Рис. 2.29. Корпус адсорбера

Технические характеристики адсорберов угольных приведены в табл. 2.18. Срок службы сорбента определяется по сохранению показателей аэродинамического сопротивления и эффективности очистки.

ФГУП «Красная звезда» выпускает разработанные ВНИИНМ модульные фильтры-адсорберы ФАМ–1500, имеющие преимущества по сравнению с адсорберами угольными АУ–1500, АУИ–1500–1: – возможность кантовки корпуса адсорбера при монтаже (с последующим монтажом модулей на месте установки);

– возможность замены адсорбента без разрезки корпуса адсорбера;

– возможность периодической проверки эффективности очистки модулей по молекулярному йоду и метилиодиду на стенде (без демонтажа корпуса адсорбера с места установки).

Таблица 2.18 – Технические характеристики адсорберов угольных

Характеристика и единица физической величины		Значение для адсорбера	
		АУ–1500	АУИ–1500–1
1		2	3
Производительность адсорбера, м ³ /ч		1500	
Скорость воздуха в свободном сечении, м/с		0,4	0,44
Допустимое разрежение в аппарате, кПа		9,8	
Аэродинамическое сопротивление, кПа		2,45	не более 2,55
Высота слоя угля, мм		360...420	360±5
Марка угля		СКТ–3	СКТ–3И
Удельная нагрузка на адсорбционный слой от подпружиненной подвижной решетки, кПа		0,98	0,98±0,35
Рабочая температура, °С		≤ 40	≤ 60
Относительная влажность воздуха, %		не более 70	не более 90
Основной материал		сталь 12Х18Н10Т	
Габариты, мм	длина	1 315	не более 1 315
	высота	800	не более 812,5
	диаметр	1 115	–
	ширина	–	не более 1 150
Масса, кг		360	300±6%

Технические характеристики модульного фильтра-адсорбера ФАМ–1500 приведены в табл. 2.19, устройство показано на рис. 2.30.

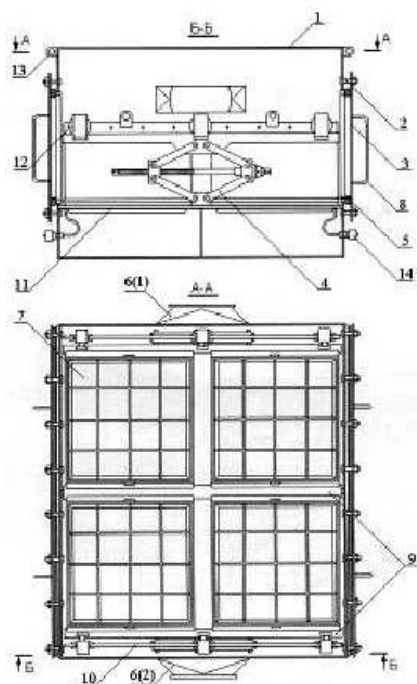


Рис. 2.30. Фильтр-адсорбер ФАМ–1500: 1 – корпус; 2 – зажим; 3 – люк; 4 – подъемник; 5 – уплотнитель; 6(1), 6(2) – патрубки; 7 – модуль; 8 – ручка; 9 – платформа; 10 – пластина; 11 – панель разделительная; 12 – ролик; 13 – проушина

Таблица 2.19 – Технические характеристики модульного фильтра-адсорбера ФАМ–1500

Характеристика и единица физической величины		Значение
1		2
Производительность адсорбера, м ³ /ч		1 500
Количество модулей		4
Температура газа на входе, °С, не более		90
Максимально допустимая температура газа при кратковременной эксплуатации (не более 2 ч)		150
Относительная влажность воздуха, %, не более		90
Марка активированного угля		СКТ–ЗИК
Рабочая температура, °С		≤ 40
Коэффициент очистки, %, не менее	по молекулярному йоду	99,9
	по метилйодиду	99,0
Габариты, мм	длина	1 315
	ширина	1 254
	высота	790
Срок службы при периодической замене сорбента, лет, не менее		20
Масса модуля, кг		50
Масса фильтра-адсорбера в сборе, кг, не более		350

Фильтровальные установки. Установки фильтровальные комбинированные типа УФКПЭ (рис. 2.32) различной производительности представляют собой секционную конструкцию в корпусе из нержавеющей или углеродистой стали, состоящую из следующих по направлению потока воздуха секций:

- секция фильтров-каплетуманоуловителей;
- электронагреватель;
- секция аэрозольной очистки;
- две секции йодной очистки;
- секция аэрозольной очистки.

Установки УФКПЭ обеспечивают комбинированную очистку воздуха от:

- аэрозолей, в т.ч. радиоактивных;
- радиоактивного йода;
- органических соединений радиоактивного йода.

В зависимости от класса безопасности и требований, заложенных генпроектантом, установка снаряжается набором унифицированных по размеру модулей различного назначения (аэрозольные, универсальные, противойодные).

Установки фильтровальные УФАИПЭ–1500 (рис. 2.32) системы жизнеобеспечения персонала БЩУ совмещают функции аэрозольных фильтров предварительной и высокоэффективной очистки (типа ФВЭА–3500–2 на базе стекловолокнистых фильтрующих материалов) и фильтров-поглотителей (типа ФАИ–2000–1Е с гранулированным угольным

сорбентом СКТ–3ИК, содержащим комплекс на базе триэтилендиамина и йодида бария) в системе жизнеобеспечения персонала БЦУ.



Рис. 2.31. Установка
фильтровальная
комбинированная типа УФКПЭ



Рис. 2.32. Установка
фильтровальная
УФАИПЭ–1500

Установка фильтровальная УФАИПЭ–1500 предназначена для комплексной очистки приточного воздуха от радиоактивных аэрозолей, молекулярного радиоактивного йода и его органических соединений.

Установка используется в целях обеспечения обитаемости пультов управления в условиях чрезвычайной ситуации – появление в районе площадки АЭС вредных веществ при авариях в результате техногенной деятельности человека (аварийный выброс на АЭС в окружающую среду радиоактивных аэрозолей и газов, пожар на АЭС, появление в атмосферном воздухе в районе воздухозаборов токсичных веществ).

Таблица 2.20 – Технические характеристики УФКПЭ

Эффективность очистки, %:	Значения
– по радиоактивным аэрозолям;	99,9
– по молекулярному йоду;	99,9
– по органическим соединениям радиойода	99,0
Номинальная производительность, м ³ /ч	от 2000 до 12000
Допустимая относительная влажность, %:	
– постоянно	до 90
– временно	от 100 в течение 24 ч
Допустимые температуры, °С:	
– постоянно	от 120
– временно	до 150 в течение 24 ч
Сохранение коэффициента очистки в течение срока	2 года

Таблица 2.21 – Технические характеристики УФАИПЭ–1500

Эффективность очистки, %:	Значения
– по радиоактивным аэрозолям;	99,97
– по молекулярному йоду;	99,9
– по органическим соединениям радиойода	99
Номинальная производительность, м ³ /ч	1500
Допустимая относительная влажность, %	до 90
Допустимые температуры, °С:	
– минимальная;	–26
– максимальная	+50
Масса установки, кг	650
Габариты: длина, высота, ширина, мм	1744x1646 x830

* Конечные сопротивления фильтровальных и сорбирующих модулей зависят от количества, дисперсного и химического состава аэрозольных примесей, поступивших в систему с приточным воздухом. Регламентируется только сумма этих сопротивлений, которая не должна превышать 1500 Па.

** Указанная эффективность очистки обеспечивается наличием сменных фильтровальных модулей ФВЭА–3500–2 класса Н13–Н14 (эффективность не менее 99,97 %). Эффективность установки сохраняется на весь период работы фильтровальных модулей вплоть до их замены.

2.2.4. Система спецгазоочистки. Назначение системы спецгазоочистки [11]

Система очистки технологических сдувок (спецгазоочистка) предназначена для уменьшения выброса радиоактивных инертных газов, радиоактивного йода и аэрозолей из газообразных сдувок технологического оборудования РО, выделяющихся во всех режимах эксплуатации. Система спецгазоочистки TS20 предназначена для очистки от радиоактивных загрязнений технологических сдувок, поступающих из [12–13]:

- охладителя организованных протечек TY10W01;
- прямка (бака) организованных протечек TY20B01;
- баков борсодержащих вод ТВ30B01,02;
- системы дожигания водорода TS10.

Кроме того, в систему СГО периодически могут поступать сдувки из:

- гидроемкостей САОЗ YT11–14B01;
- теплообменников охлаждения бассейна выдержки.

Спецгазоочистка является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности, в части обеспечения функций по удержанию радиоактивных продуктов в установленных границах.

В процессе работы система обеспечивает:

- в режимах нормальной эксплуатации и при авариях, исключая аварии с повышением давления под оболочкой выше 1,3 кгс/см², основным критерием работоспособности системы является обеспечение очистки газовых сдувок на 2 – 2,5 порядка (по ИРГ);

– степень очистки газа по ИРГ, йодам и аэрозолям при нормальной эксплуатации должна исключить превышение предельно–допустимых норм по выбросам радиоактивных веществ, установленных действующими нормативами.

Упрощенная схема СГО (рис. 2.33) состоит из трех независимых одинаковых по устройству взаимозаменяемых линий (именуемых “нитками”):

– основной, работающей постоянно и обеспечивающей очистку газа после системы дожигания водорода;

– вспомогательной, обеспечивающей постоянную очистку газовых сдувок из баков борсодержащих вод ТВ30В01,02, охладителя организованных протечек ТУ10W01, прямка организованных протечек ТУ20В01;

– резервной.

В соответствии со схемой распределения газовых сдувок одна нитка СГО TS21(22,23) должна всегда работать на очистку газов через TS21(22,23)S02. В основном сдувки составляет разбавленная азотом газовая смесь с баков ТВ30В01,02 и ТУ20В01.

Расход газовой смеси в этой нитке осуществляется работой газодувки TS21(22,23)D02.

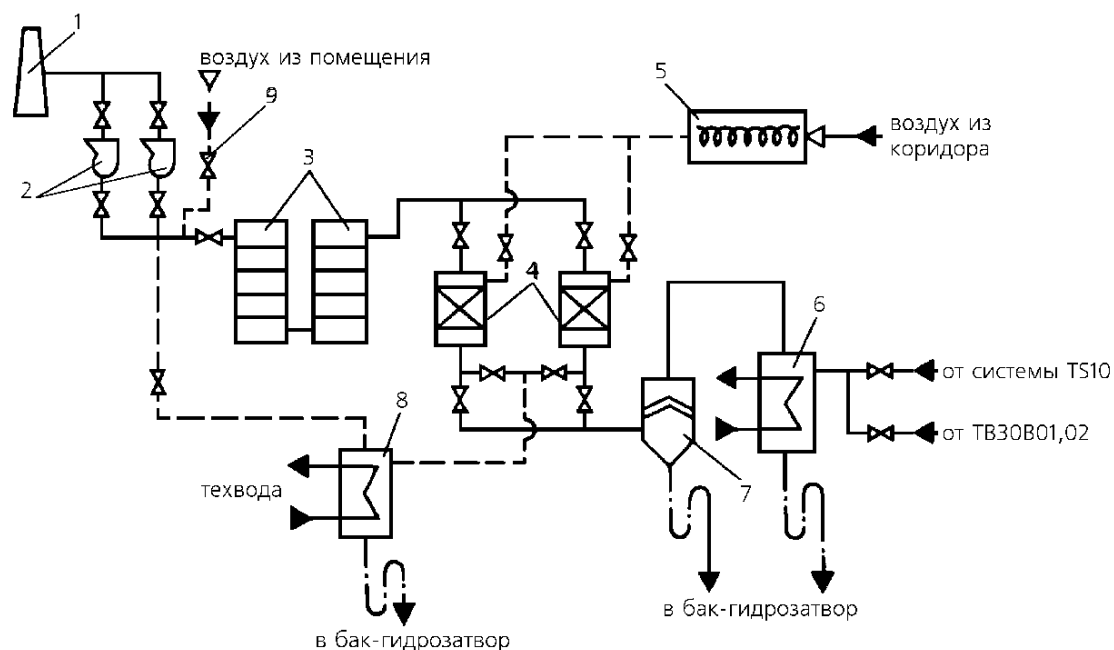


Рис. 2.33. Упрощённая схема системы СГО (на примере нитки TS20):

- 1 – венттруба блока; 2 – газодувки TS21D01,02; 3 – фильтр–адсорбер TS21N04–07;
4 – цеолитовые фильтры TS21N02,03; 5 – нагреватель контура регенерации TS31W02,03;
6 – теплообменники TS21W01,02; 7 – самоочищающийся фильтр TS21N01;
8 – теплообменник контура регенерации TS31W01; 9 – автоматический регулятор расхода

Согласно инструкции TS20 нитка СГО, работающая через TS21(22,23)S02, называется вспомогательной рабочей, так как при нормальной эксплуатации энергоблока система TS10 постоянно находится в работе, а это требует постоянной работы системы СГО для очистки газовой смеси. Поэтому дополнительно к вспомогательной рабочей должна функционировать еще одна нитка СГО.

Согласно инструкции по эксплуатации нитка СГО, работающая через TS21(22,23)S01 называется основной рабочей. В связи с тем, что в системе дожигания водорода TS10 (являющейся основным поставщиком радиоактивных сдувок в основной рабочей нитке) работает газодувка, то в проекте был принят режим работы основной рабочей линии без включения в нее газодувок TS21(22,23)D01,02 (по байпасу TS21(22,23)S12).

В поддержку этого режима проектом предусмотрена блокировка, которая при открытии TS21(22,23)S01 автоматически открывает байпас TS21(22,23)S12.

Таким образом, при нормальной работе блока одна нитка СГО работает в качестве основной рабочей, другая – вспомогательной рабочей, третья находится в регенерации или резерве.

Газовые сдувки, подаваемые на очистку в любую нитку, охлаждаются в теплообменнике TS21(22,23)W01,02 до температуры 20...30 °С [15].

Охлажденная газовая смесь поступает в самоочищающийся фильтр TS21(22,23)N01 (пом. А–417/_{1,2,3}) для “грубой” осушки и очистки от аэрозолей. Сконденсировавшаяся в TS21(22,23)W01,02 и TS21(22,23)N01 влага по

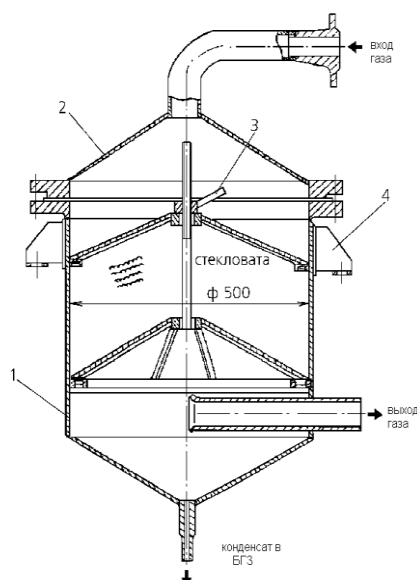


Рис. 2.34. Конструкция фильтра самоочищающегося TS21(22,23)N01: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – рукоятка; 4 – опора

дренажным трубам отводится в бак-гидрозатвор и далее в спецканализацию. Конструкция самоочищающегося фильтра показана рис. 2.34.

Затем газовая смесь поступает в рабочий цеолитовый фильтр TS21(22,23)N02,03 (пом. А–418/_{1,2,3}), в котором происходит ее “тонкая” осушка за счет адсорбции влаги на цеолите.

Выделившееся в процессе поглощения цеолитом влаги тепло (до 900 ккал/кг влаги) отводится охлаждающей водой группы “А”, подаваемой в рубашку и змеевик фильтра.

Конструкция цеолитового фильтра показана на рис. 2.35.

Далее сухой охлажденный газ поступает в основной элемент установки – фильтр-адсорбер TS21(22,23)N04–07 (пом. А–419/_{1,2,3}).

В адсорбере газ подвергается очистке от

радиоактивных изотопов йода и ИРГ (ксенона, криптона). Нормальное функционирование системы СГО характеризуется снижением концентрации ИРГ на 2 – 2,5 порядка, т.е. при объемной активности входящих газов 5–50 Ки/нм³ значение объемной активности газов на выходе 0,05...0,5 Ки/нм³.

В номинальном режиме для достижения наилучшей степени очистки расход очищаемого газа его скорость не должен превышать 12 нм³/ч. После тонкой очистки на активированном угле газ поступает в венттрубу с помощью газодувки. По проекту выброс из системы спецгазоочистки СГО должен выполняться во внутреннюю трубу. Радиационный контроль осуществляется до и после фильтров-адсорберов, а также в венттрубе.

При работе газодувки TS21(22,23)D01 регулирование расхода газа через вспомогательную рабочую нитку производится клапанами TS21(22,23)S13 таким образом, чтобы на всасе газодувок постоянно поддерживалось давление – 0,1 кгс/см². При нормальном режиме работы РУ система СГО работает с постоянным расходом.

Эффективность очистки зависит от времени задержки активированным углем адсорбированных изотопов в объеме фильтра-адсорбера. В процессе работы фильтра-адсорбера фронт концентрации очищаемых веществ, остающихся на активированном угле, постепенно сдвигается к выходу из фильтровальной колонны. Поэтому для эксплуатации важно не производить в системе резких увеличений расхода, так как это может привести к уменьшению общего коэффициента очистки и выбросу нераспавшихся частиц.

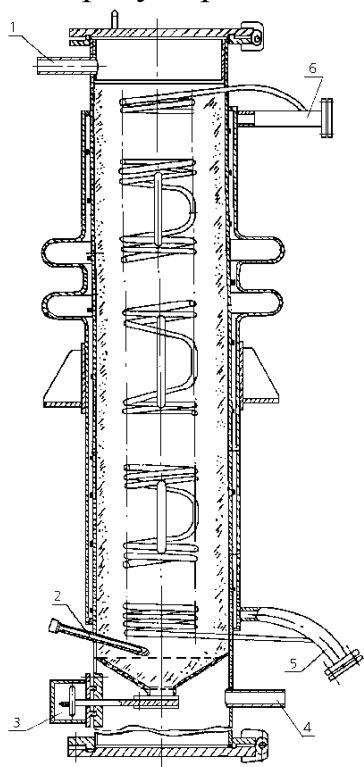


Рис. 2.35. Конструкция цеолитового фильтра TS21(22,23)N02,03: 1 – патрубок входа газовой смеси; 2 – чехол под термопару; 3 – устройство для выгрузки цеолита; 4 – патрубок выхода газовой смеси; 5 – вход охлаждающей воды; 6 – выход охлаждающей воды

Также важно поддержание постоянного температурного режима: при повышении температуры активированного угля ухудшается коэффициент адсорбции и последствия будут те же, что и для резкого увеличения расхода.

Каждая из ниток обеспечивает очистку радиоактивных газов с расходом до $60 \text{ нм}^3/\text{ч}$, однако оптимальной является работа нитки с расходом газа на очистку до $12 \text{ нм}^3/\text{ч}$. Все газовые сдвиги, во избежание образования в них взрывоопасных концентраций водорода, разбавляются азотом.

Очистка воздуха от радиоактивных газов и аэрозолей осуществляется в две ступени. На первой ступени производится грубая очистка воздуха на самоочищающихся фильтрах TS21–23N01, где в качестве фильтрующего материала применяется стекловолокно. Его главное достоинство – продолжительный срок службы, оно стойко по отношению к кислотам и щелочам.

Помимо аэрозолей на этом этапе улавливаются мельчайшие капельки влаги, поэтому фильтры оборудованы дренажами.

При работе самоочищающегося фильтра из стекловолокна желательна повышенная влажность входящего на очистку воздуха. В этом случае фильтрующая насадка из стекловолокна поддерживается во влажном состоянии за счет конденсации пара.

Увлажнение исключает затвердение осадка загрязнений и обеспечивает его непрерывное удаление с фильтрующего материала в виде раствора или пульпы, что исключает частую замену стекловолокна. Коэффициент очистки таких фильтров достаточно высок.

На второй ступени для очистки воздуха от короткоживущих РБГ применяют адсорбционные фильтры (колонны) TS21–23N04–07. В качестве засыпки для таких фильтров используют активированный уголь торфяной уголь-серно-калиевой активации типа СКТ–3, обеспечивая высокую степень очистки (выше 99 %).

Для короткоживущих радионуклидов они действуют по принципу “вечных колонн”, которые работают в непрерывном режиме; срок их службы определяется только износом сорбента.

В «вечных колоннах» одновременно с адсорбцией происходит естественный распад радионуклидов, задержанных в сорбенте. При объеме адсорбера 20 м^3 время задержки криптона составляет 3,5 суток, ксенона более 42 суток (периоды полураспада криптона-85 и ксенона-133 составляют, соответственно, 44 часа и 5,29 суток) [8].

Достаточно хорошо сорбируется на активированном угле при комнатной температуре радиоактивный йод. Хуже сорбируется йод, находящийся в виде соединений, например, метилйодид. Коэффициент очистки для него при комнатной температуре составляет около 50 и

увеличивается с понижением температуры. При температуре минус 180 °С (температура жидкого азота) йод сорбируется полностью, однако поддержание такой температуры технически очень сложно и в системе СГО не производится.

Свойства активированного угля как адсорбента определяются характером его пористой структуры, так как основным работающим звеном при адсорбции газов угольным адсорбером являются микропоры, а размеры и количество микропор в угле зависят от способа приготовления, так как угли отличаются друг от друга плотностью, объемом пор, размерами гранул и поэтому имеют разные коэффициенты адсорбции.

При работе системы спецгазоочистки воздух из самоочищающихся фильтров TS21–23N01 выходит влажным. Однако адсорбционные колонны с активированным углем боятся повышенной влажности, так как при поглощении влаги происходит существенное снижение его адсорбционных свойств по отношению к инертным газам.

Так, коэффициент адсорбции криптона и ксенона на увлажненном угле – существенно ниже, чем на сухом. Также накопление влаги приводит к слипанию частиц адсорбента.

Для осушки воздуха обычно устанавливаются сорбционные фильтры, улавливающие влагу, либо повышают температуру воздуха на 5...10 °С. В системе СГО TS20 для поглощения излишней влаги перед фильтрами-адсорберами установлены цеолитовые фильтры TS21–23N02,03. В системах очистки технологических сдувок АЭС для осушки газа рекомендуют применять цеолит марки NaA, обладающий высокой влагоемкостью и очень слабой адсорбционной способностью по отношению к Kr и Xe.

По мере насыщения цеолитового фильтра поглощенной влаги из воздуха эффективность его падает, поэтому периодически включается предусмотренный в системе резервный фильтр.

При этом насыщенный влагой фильтр регенерируется продувкой цеолита нагретым до 400...450 °С воздухом [8]. Поскольку цеолит марки NaA, практически не сорбирует йод, ксенон и криптон, поэтому в процессе регенерации в венттрубу выбрасывается незначительное количество радиоактивных изотопов. Активированный уголь фильтров-адсорберов адсорбирует значительное количество воздуха. Поэтому при изменении давления газа в системе наблюдаются переходные процессы, обусловленные адсорбцией или десорбцией воздуха. Чтобы обеспечить работоспособность системы в любом режиме, всас газодувок оборудован автоматической системой поддержания постоянного разряжения в фильтрах-адсорберах (установлены регулирующие клапаны TS21–23S13).

2.3. Приборы контроля газоаэрозольных выбросов

Технические средства контроля газоаэрозольных выбросов, учетные и оперативные средства ИДК, автоматизированные системы контроля радиационной обстановки должны работать как в нормальных, так и в аварийных условиях эксплуатации радиационного объекта. Существует большой перечень приборной базы для контроля ГРО.

К приборам непрерывного (оперативного) контроля относится контроль посредством автоматизированных систем радиационного контроля (АСРК). Этот вид контроля предполагает сбор информации количественного характера, который не требует длительных наблюдений, но показывает тенденцию развития радиационной обстановки. К эпизодическому (инспекционному) контролю относится, например, дозиметрический контроль рабочих мест с целью оценки условий труда. Периодический (текущий) контроль индивидуальных доз осуществляется, например, при индивидуальном дозиметрическом контроле внешнего облучения [15].

Для контроля радиационной обстановки используются дозиметрические, радиометрические и спектрометрические приборы. Дозиметрические приборы предназначены для измерения операционных дозиметрических величин: амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов доз, являющихся консервативными оценками нормируемых величин: эффективной и эквивалентных доз [15].

Аэрозольный альфа-радиометр РАА-20П2 («ПОИСК»). Портативный прибор для определения нормируемой величины — эквивалентной равновесной объёмной активности дочерних продуктов распада (ЭРОА ДПР) радона и торона в воздухе. Обработка результатов измерения и их хранение производится микрокомпьютером, входящим в состав прибора.

Назначение: измерение эквивалентной равновесной объёмной активности (ЭРОА) дочерних продуктов радона и дочерних продуктов торона в воздухе; измерение мощности эффективной дозы (МЭД) внешнего гамма-излучения.

Область применения:

- проведение радиационно-гигиенических обследований зданий, сдаваемых в эксплуатацию после окончания строительства, реконструкции или капитального ремонта, а также действующих жилых, общественных и производственных зданий;
- радиационный контроль в рудниках и других подземных сооружениях;
- оценка радиоактивного загрязнения окружающей среды.



Рис. 2.36. Фото PAA–20P2 («ПОИСК»)

«Поиск» — отбор пробы воздуха на фильтр с одновременной селективной регистрацией альфа-излучения ^{218}Po (RaA) и ^{214}Po (RaC) для экспрессного измерения ЭРОА дочерних продуктов радона в воздухе, а также оценки «фактора равновесия», ОА радона в воздухе и кратности воздухообмена в помещении.

«САС» — (суммарный альфа-счёт) — продолжение измерения активности фильтра после окончания отбора пробы для уточнения значения ЭРОА дочерних продуктов радона, а также для измерения ЭРОА дочерних продуктов торона в воздухе по альфа-излучению ^{212}Bi и ^{212}Po . Измерение ЭРОА дочерних продуктов торона выполняется не ранее, чем через 5 часов после окончания пробоотбора в состоянии радиоактивного равновесия дочерних продуктов распада торона ^{212}Pb и ^{212}Bi на фильтре.

«МЭД» — измерение мощности эффективной дозы внешнего гамма-излучения, выполняемое либо в автоматическом режиме одновременно с отбором пробы воздуха на фильтр, либо по команде оператора.

С целью максимальной автоматизации измерений и обработки результатов в радиометре используется миниатюрный карманный персональный компьютер, который управляется в диалоговом режиме, что позволяет:

- оперативно обрабатывать результаты измерений и выводить их на дисплей, начиная с первых секунд измерения, с указанием текущих значений измеряемой величины и погрешности измерений;
- применять «свободную» (не ограниченную заданными интервалами времени пробоотбора и определения активности фильтра)

методику измерения, что позволяет оптимизировать затраты времени на контроль и существенно повысить его производительность;

- облегчить работу оператора-радиометриста за счёт вывода на дисплей необходимой информации, сопровождающейся голосовыми комментариями при подаче команд и выдаче сообщений. В частности, на экран выводятся: номер пробы, дата и время выполнения измерения, текущая и прогнозируемая (обеспечивающая заданную точность) продолжительность измерения, количество импульсов, зарегистрированных в каналах. «Подсказка» информирует об очередности выполнения измерений в режиме «САС», а также о необходимости измерения ЭРОА дочерних продуктов торона в воздухе;

- оперативно создавать и просматривать базу данных; при сохранении результатов измерений с помощью всплывающей клавиатуры на экране компьютера в окне «Место отбора» указывается адрес и характеристики объекта контроля; предусмотрена возможность передачи базы данных в обычный компьютер с последующим преобразованием в формат MS Excel;

- использовать встроенные в операционную систему компьютера дополнительные функции: Интернет, электронная почта, расписание, контакты, календарь, калькулятор, аудиоплеер, фотоальбом, записная книжка и т.д.; возможность ввода информации в записную книжку компьютера в графическом виде позволяет отказаться от привычных блокнотов и ручек.

Встроенный дозиметрический блок для автоматического измерения МЭД внешнего гамма-излучения (в том числе, одновременно с отбором пробы воздуха на фильтр) значительно облегчает работу и сокращает затраты времени на выполнение большого количества радиационных обследований при приёмке зданий в эксплуатацию. «Установки» позволяют задавать количество и погрешность измерений МЭД в точке контроля, а также уровень сигнализации о превышении контрольного значения МЭД.

В радиометре реализованы два различных метода определения ЭРОА дочерних продуктов радона (режимы «Поиск» и «САС»). Сравнение результатов, полученных независимыми методами, позволяет контролировать стабильность метрологических характеристик радиометра непосредственно во время выполнения измерений.

Специальная кожаная сумка обеспечивает удобство выполнения измерений и транспортировки, а также защищённость радиометра.

В радиометре предусмотрена многоуровневая индикация заряда аккумулятора.

Таблица 2.22 – Характеристики РАА–20П2 («ПОИСК»)

Диапазон измерений ЭРОА радона и торона в воздухе	$1 \div 10^5$ Бк/м ³
Продолжительность экспрессной оценки ЭРОА радона на уровне 100 Бк/м ³ , не более	8 мин.
Основная погрешность измерений (P=0,95), не более	30%
Рабочий диапазон значений температуры окружающего воздуха	5°C ÷ 40°C
Рабочий диапазон значений относительной влажности воздуха при температуре +30°C	до 95%
Продолжительность работы в автономном режиме, не менее	8 ч (более 60 измерений за рабочую смену)
Масса радиометра, не более	2 кг
Габаритные размеры	250 x 180 x 90 мм

Установка радиометрическая УДИ–1Б. Непрерывное спектрометрическое определение, индикация на встроенном индикаторе и передача по информационной сети значений объёмных активностей радионуклидов йода I–131, I–132, I–133 и I–135.



Рис. 2.37. Фото установка радиометрическая УДИ–1Б

Назначение: непрерывное спектрометрическое определение, индикация на встроенном индикаторе и передача по информационной сети значений объёмных активностей радионуклидов йода I–131, I–132, I–133 и I–135.

Область применения: измерение объёмных активностей радионуклидов йода I–131, I–132, I–133 и I–135 в воздухе рабочих помещений и вентиляционных системах.

Свойства:

- встроенный расходомер воздуха;

- проверка работоспособности с помощью встроенного (имплантированного) в кристалл детектора источника Am-241;
- компенсация воздействия внешнего гамма-фона;
- интерфейс связи RS-232, RS-485, Ethernet;
- местная индикация объёмной активности;
- звуковая и световая сигнализация превышения устанавливаемых порогов;
- возможность отбора проб воздуха из систем вентиляции;
- настройка с помощью переносного компьютера;
- наличие выхода «сухой контакт»;
- возможность подключения блока аварийной сигнализации БАС–01;
- стационарное и мобильное исполнение с собственным насосным блоком;
- работа от внешней системы пробоотбора;
- периодическая поверка без демонтажа с помощью прилагаемого источника;
- стационарное средство измерения с собственным насосным блоком или с работой от внешней магистрали пробоотбора;
- мобильное средство измерения на тележке с насосным блоком;
- точка непрерывного контроля в системе радиационного контроля с передачей информации в локальную сеть;
- установка соответствует требованиям класса безопасности ЗН по ОПБ 88/97 и на ядерные и радиационно-опасные объекты поставляется с приемкой ГАН РФ.

Принцип действия основан на анализе энергетического спектра частиц различных молекулярных форм, испускаемых радионуклидами, осевшими на сорбционно-фильтрующем материале в результате прокачки через него воздуха.

Комплектация:

- установка УДИ–1Б;
- кабель связи (RS 232) с компьютером;
- программное обеспечение для поверки и настройки;
- руководство по эксплуатации;
- свидетельство о первичной поверке;
- фильтрующий материал ФПУА–70–7.0 (5 комплектов).

Таблица 2.23 – Характеристики установки радиометрической УДИ–1Б

Тип детекторов	сцинтилляционный спектрометрический CsI(Tl)
Количество детекторов	2 (основной и компенсационный для компенсации внешнего гамма-фона)
Диапазон измерения:	
в режиме накопления за 6 часов в режиме наблюдения	$1,0 \cdot 10^{-1} \div 1,0 \cdot 10^5$ Бк/м ³ $3,7 \cdot 10^0 \div 3,7 \cdot 10^8$ Бк/м ³
Энергетический диапазон регистрации	60 ÷ 3000 кэВ
Время измерения, не более	1000 с (в режиме наблюдения, уменьшается с увеличением активности)
Собственный фон установки для гамма-канала, не более	0,1 Бк/м ³
Объемный расход воздуха через сорбционную ловушку, не более	10 л/мин
Погрешность измерения расхода воздуха	± 10%
Объем архива, не менее	3 000 результатов измерений
Диапазон рабочих температур	–10 ÷ +50°С
Питание	сеть 220 (–15%,+10%) В, 50 Гц ± 5%
Габаритные размеры	496×359×724 мм
Масса	36 кг
Сорбционный материал	сорбционно–фильтрующий материал ФПУА–70–7.0
Ресурс работоспособности сорбционного материала, не более	2 000 ч
Наработка на отказ установки	10 000 ч

* Программа «Конфигуратор» — для проверки работоспособности, настройки, поверки, анализа данных (в том числе архивных) в устройствах серии БОП СРК «Пеликан». Программа поддерживает следующие устройства: БОП; УДА–1АБ; УДГ–1Б; БОП–1С; БОП–1М. С помощью программы «Конфигуратор» можно прочитать информацию о внутреннем состоянии прибора, вывести информацию о возможных ошибках и сбоях в его работе, произвести настройку отдельных параметров или переключить его режим работы. Кроме того, можно изъять архивные данные измерений и рабочие спектры для дальнейшего анализа.

Установка для измерений объемной активности радиоактивных газов в воздухе УДГ–1Б. Установка для непрерывного автоматического контроля концентрации бета-излучающих радиоактивных газов в автономном режиме или в составе автоматических систем радиационного контроля в воздухе рабочих помещений и систем вентиляции.



Рис. 2.38. Фото установки для измерений объемной активности радиоактивных газов в воздухе УДГ–1Б

Назначение: измерение объемной активности бета–излучающих газов (аргон, криптон, ксенон).

Свойства:

- встроенный индикатор прокачки воздуха;
- компенсация воздействия внешнего гамма-фона;
- интерфейсы связи RS–232, RS–485, Ethernet;
- звуковая и световая сигнализация превышения устанавливаемых порогов;
- работа с собственным насосным блоком или с внешней магистралью пробоотбора;
- настройка с помощью переносного компьютера;
- периодическая поверка без демонтажа с помощью образцового источника;
- наличие выхода «сухой контакт»;
- возможность подключения блока внешней аварийной сигнализации БАС.

Принцип действия: регистрация бета-частиц, испускаемых бета-активными газами в рабочей камере.

Базовый комплект:

- установка УДГ–1Б;
- кабель питания;
- кабель связи с ПЭВМ RS–232;
- защитное кольцо с пленкой 2 шт.;
- контрольный источник;
- держатель контрольного источника;
- монтажный комплект;
- программное обеспечение "Конфигуратор".

По заказу:

- трубка силиконовая медицинская одноканальная ТСМ–10/16 – упаковка 20 м (для измерений в системах вентиляции);
- узел крепления (настенный);
- блок насосный БН–01 (мобильный или настенный);
- фильтр аэрозолей с комплектом из 10 шт. фильтров АФА–РМП–20 (при работе в автономном режиме без УДА–1АБ, для предотвращения попадания аэрозолей и пыли в рабочий объем камеры)
- фильтр аналитический аэрозольный АФА–СИ–20 10 шт/;
- аналоговый выход ($4 \div 20$ мА).

Описание установки и ее составных частей. Установка комплектуется интерфейсом RS–232 и интерфейсами Ethernet IEEE 802.3 и RS–485. RS–232 является служебным интерфейсом для управления, диагностики, настройки и ремонта с помощью программы «Конфигуратор», а RS–485 и Ethernet IEEE 802.3 внешними интерфейсами для включения установки в системы радиационного контроля. Устройство, подключенное к выходу «сухой контакт», может быть включено/выключено при превышении уставки.

Внешний блок аварийной сигнализации подключается к разъему БАС.

Установка управляет собственным насосным блоком и может управлять внешними исполнительными устройствами (например, электромагнитными клапанами при работе с внешней магистралью пробоотбора), подавая напряжение 220 В (50 Гц) (разъем «К НАСОСУ»).

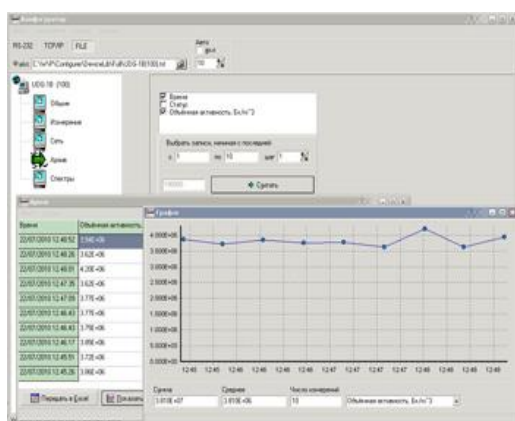


Рис. 2.39. Програмное обеспечение



Рис. 2.40. Фото установки сбоку

Программа «Конфигуратор» служит для управления, диагностики, настройки и ремонта установки, а также позволяет считывать данные с архива установки.

Первичная поверка установки производится по рабочему эталону Кг-85. Определение чувствительности к бета-излучению Sr-90(Y-90) и нелинейности градуировочной характеристики при периодической поверке установки производится с помощью комплекта рабочих эталонов 2-го разряда типа 1СО с внешним излучением в угол 2π : $5 \cdot 10^1$, $5 \cdot 10^2$, $5 \cdot 10^3$, $4 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^6$ част/с в держателе.

Дезактивация измерительной камеры проводится протиркой тампонами внутренней поверхности камеры или промывкой камеры дезактивирующим раствором. Раствор сливается через сливной патрубок на дне установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612–10. ОСПОРБ–99/2010 (ред. от 16.09.2013) 2013. – 87 с.
2. "Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009)". Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523–09. – 2009. – 87 с.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности" (НП–021–15) N 244 – 2015. – 17 с.
4. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами // Серия учебных курсов МАГАТЭ. – Вена, МАГАТЭ. – 2005. – 230 с.
5. Концерн «Росэнергоатом». Балаковская АЭС. Служба подготовки персонала. – Ч.2. – С. 144.
6. Инструкция по эксплуатации реакторных установок энергоблоков 1÷6 Балаковская АЭС. 1÷6.РО.УС.ИЭ.25.01Б.
7. Денисов В.П. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций / В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов. М.: ИЗДАТ, 2002 .
8. Чечеткин Ю.В. Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС / Ю.В. Чечеткин, Е.К. Якшин, В.М. Ещеркин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
9. Коптелов Е.И. Радиметрия–ВМФ / Е.И. Коптелов, Г.И. Котивец.– 1972. – 535 с.
10. Абрамов А.А. Методическое руководство к курсу. Основы радиохимии и радиоэкологии / А.А. Абрамов, Г.А. Бадун. – М., Баку, 2011. – С.140.
11. Инструкция по эксплуатации системы спецгазоочистки 1÷6. РО.ТС.ИЭ.12.02А.
12. ГОСТ 26306–84. Источники бета-излучения радионуклидные закрытые. – С. 39. Источники бета-излучения радионуклидные закрытые. ГОСТ 26306084. 1985. – С. 39. www.complexdoc.ru.
13. Эталонные (образцовые) спектрометрические источники излучения [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (123 Kbytes). – Р.:ЗАО «РИТВЕРЦ», 2013. – Режим доступа: <http://www.ritverc.ru> <http://www.ritverc.com/products/list.php?ID=325> Saturday, 25 October 2013 12:25:02.
14. Источники α -, β -, γ - и нейтронного излучений. Каталог. – М.: Атомиздат, 1970. – С. 98.
15. Методические указания. Контроль радиационной обстановки. Общие требования. (МУ 2.6.5.008) – 2016. – 82 с.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что собой представляет ядерный реактор?
2. Что собой представляет активная зона реактора ВВЭР?
3. Материал изготовления оболочек твэлов.
4. Как часто производится замена ТВС?
5. Что включает в себя первый контур теплосъема?
6. Что включает в себя второй контур теплосъема?
7. Какова электрическая мощность энергоблоков реактора ВВЭР-1000 (В-320)?
8. Состав реактора ВВЭР-1000 (В-320).
9. Назначение реакторной установки.
10. Оснащение реакторной установки В-320.
11. Как осуществляется принудительная циркуляция теплоносителя?
12. За счет чего происходит нагрев воды в активной зоне реактора?
13. Как осуществляется регулирование тепловыделения в реакторе?
14. Элементы, обеспечивающие безопасную остановку и расхолаживание реактора.
15. Основные части реактора на тепловых нейтронах.
16. Определение мгновенных нейтронов.
17. Определение запаздывающих нейтронов.
18. Определение нейтронов активации.
19. Определение фотонейтронов.
20. Происхождение мгновенного γ -излучения деления.
21. Происхождение γ -излучения короткоживущих продуктов деления.
22. Происхождение γ -излучения долгоживущих продуктов деления.
23. Происхождение захватного γ -излучения.
24. Происхождение γ -излучения при неупругом рассеянии нейтронов.
25. Происхождение γ -излучения продуктов реакций.
26. Происхождение γ -излучения продуктов активации.
27. Происхождение аннигиляционного γ -излучения.
28. Происхождение тормозного γ -излучения.
29. Почему теплоноситель является источником γ -излучения?
30. Почему оборудование технологического контура АС становится источником гамма-излучения?
31. Перечислить основные характеристики активной зоны.
32. Источники образования ИГР на АЭС.
33. Основные газообразные продукты деления при работе АЭУ.
34. Какие процессы происходят в сердечнике твэла?
35. Чем вызвана газовая активность водного теплоносителя?
36. Источники образования трития в реакторе.
37. Назовите стадии повреждения твэлов.
38. Источники образования радиоактивного йода в реакторе.

39. Радионуклидный состав аэрозолей.
40. Источники образования аэрозолей.
41. Причина прохождения радиолиза воды в первом контуре, и каков результат?
42. Последствия вторичных эффектов при радиолизе воды.
43. Перечислите активационные газы.
44. Напишите реакции образования активационных газов.
45. Напишите реакции образования трития.
46. Как зависит скорость поступления трития в теплоноситель от материала оболочки твэлов?
47. Классификация РАЗ по дисперсности.
48. Процессы естественного разрушения аэрозолей.
49. Определение цеолитов, классификация, пример.
50. Дать определение селикагеля.
51. Что определяет сорбционное свойство цеолитов.
52. Требования к фильтрам, применяемые для радиометрических измерений газов и аэрозолей.
54. Определение промышленных цеолитов.
55. Какие известны стадии адсорбции газов?
56. На какие стадии можно разделить процесс адсорбции газа?
57. На какие группы можно разбить адсорбенты?
58. Какова классификация активированных углей по маркам, примеры
59. Что влияет на коэффициент очистки $K_{\text{очистки}}$?
60. Чем характеризуются активированные угли и в чем их особенность?
61. Что определяет пористая структура адсорбента?
62. В чем сущность эффекта отсеивания при очистке?
63. В чем сущность эффекта перехвата при очистке?
64. В чем сущность эффекта энергии при очистке?
65. Какие фильтры относятся к средствам воздуха от аэрозолей?
66. Какие фильтры относятся к средствам воздуха от йода?
67. Каково назначение фильтра ФАРТОС, принцип работы?
68. В чем назначение СГО?
69. Из каких основных узлов состоит СГО?
70. В чем принцип работы СГО?
71. Характеристики нормальной работы СГО?
72. Какие материалы используются в аэрозольных фильтрах?
73. Какой фильтрующий материал используется в аэрозольных фильтрах тонкой очистки?
74. Почему не применяется прямой метод измерения радиоактивных аэрозолей?
75. Написать и раскрыть формулу определения $A_{\text{РАЗ}}$ для прямоугольного окна.
76. Написать и раскрыть формулу определения $A_{\text{РАЗ}}$ для круглого окна.
77. Какие выбрасываются основные газообразные продукты деления при работе АЭУ?

78. Как рассчитывается скорость счета импульсов в камере Туркина?
79. Перечислите характеристики фильтров применяемых для осаждения радиоактивных аэрозолей.
80. Дайте определение абсорбции.
81. Дать определение адсорбции.
82. В чем сущность понятия капиллярной конденсации?
83. Дайте определение хемосорбции.
84. Перечислите полярные адсорбенты.
85. Перечислите неполярные адсорбенты.
86. Достоинства и недостатки активированных углей.
87. Достоинства и недостатки цеолитов.
88. Перечислите наиболее распространенные способы удаления криптона и ксенона.
89. Перечислить методы снижения активности газов и аэрозолей на АС.
90. Зарубежные методы удаления и обезвреживания радиоактивных отходящих газов.
91. В чем сущность и эффективность очистки методом криогенной дистилляции?
92. Что представляет собой природный цеолит?
93. Написать общую химическую формулу цеолитов.
94. От чего зависит ионно-обменная емкость цеолитов?
95. Назовите типы цеолитов.
96. Преимущества цеолитов перед ионообменными смолами.
97. Какова общая внутренняя поверхность пор активированных углей?
98. Какова максимальная температура очищаемого воздуха от йода для АУ?
99. Какие парообразные вещества способен удалять цеолит?
100. Марки АУ для очистки воздуха от йода.
101. Как и на что влияет технология изготовления промышленных активированных углей?
102. Что отражает марка цеолита и их отличия?
103. От чего зависит диаметр пор цеолита?
104. Какие виды пор присутствуют в АУ?
105. Метод получения цеолитов.
106. Угли какой марки имеют высокий коэффициент адсорбции?
107. Чем можно объяснить сорбционные и ионообменные свойства цеолитов?
108. Перечислите факторы, влияющие на сорбционные свойства активированного угля.
109. Для чего и как осуществляется сушка угля в промышленности?
110. Какой из цеолитов лучше сорбирует криптон и ксенон?
111. Какими характеристиками руководствуются при выборе сорбента?
112. Как влияет температура на эффективность сорбции АУ?
113. Как влияет температура на эффективность сорбции цеолита?
114. Влияние сопутствующих примесей на сорбционные характеристики цеолитов.

115. Принцип очистки воздуха тонковолокнистыми фильтрами от аэрозолей.
116. Что представляют собой ФПП, как расшифровывается?
117. Дать определение коэффициенту очистки η фильтрующей ткани.
118. Чем объясняется компактность фильтрующих аппаратов с ФП?
119. Какие примеси являются «отравляющими» для углей?
120. Какие характеристики у ФПП?
121. Что собой представляют фильтры ДК?
122. Какой фильтр материал у фильтра ФМП–2?
123. Перечислите фильтры для очистки воздуха от аэрозолей.
124. Преимущества и недостатки ФПП.
125. Написать формулу коэффициента проскока.
126. Какие материалы используют для фильтров грубой очистки?
127. Какие фильтры применяются для очистки сухого воздуха?
128. Расшифруйте ФПП и ФПА.
129. Существующие марки ФПП и их расшифровка.
130. Преимущества фильтра ФМП–2.
131. Назначение фильтра ФАРТОС.
132. Температура применения фильтра с ФПП.
133. Формула коэффициента очистки η фильтрующей ткани.
134. Чем и как удаляется тритий?
135. Чем и как удаляется радиоактивный ^{131}I ?
136. Что представляют собой рулонные фильтры?
137. У какой марки ФПП максимальный коэффициент проскока?
138. Как классифицируются фильтры очистки?
139. Задача вентиляционной системы.
140. Характеристики фильтров предварительной очистки.
141. Основные требования к вентиляции.
142. Чем определяется комфортная вентиляция?
143. Расшифруйте «ФАРТОС».
144. Характеристики фильтров грубой очистки.
145. Что повышает эффективность улавливания йода на АУ.
146. Производительность фильтра ФАРТОС.
147. Назначение фильтров карманного типа.
148. Назначение фильтра Фя.
149. Достоинства и недостатки фильтра Фя
150. Принцип работы фильтров карманного типа.
151. Марки фильтров Фя, и их отличия друг от друга.
152. Каким Европейским стандартом классифицируются фильтры?
153. Достоинства и недостатки фильтров карманного типа.
154. Назначение фильтра ФИБАН–500.
155. Марки и отличия фильтров ФАРТОС.
156. Принцип работы фильтра ФИБАН–500, его достоинства.
157. Назначение фильтров аэрозольных с клиновыми сепараторами.
158. Назначение, характеристики фильтров аэрозольных ФРА–95–10М.

159. Режимы работы фильтров ФАРТОС.
160. Принцип работы фильтров аэрозольных с клиновыми сепараторами.
161. Применение, конструкция и назначение фильтра ФАРТОС Ц-500 С.
162. Достоинства и недостатки фильтров аэрозольных с клиновыми сепараторами.
163. Что используется в качестве фильтрующего материала в фильтрах ФАРТОС?
164. Сравните технические характеристики фильтров ФАРТОС.
165. Назначение, основные технические характеристики фильтра ФВЭА-3500.
166. Назначение, область применения и технические характеристики фильтра ФСКО-1000.
167. Конструкции, фильтрующий материал фильтра типа ФВЭА.
168. Конструкция, технические характеристики фильтра ФАИ-3000.
169. Назначение, технические характеристики фильтра ФСГО-500.
170. Назначение, конструкция, область применения фильтра АУ-1500.
171. Преимущества ФАМ-1500 перед АУ-1500.
172. Назначение, состав УФКПЭ.
173. Назначение, конструкция, технические характеристики УФАИПЭ-1500.
174. Назначение, конструкция, технические характеристики модульного фильтра-адсорбера ФАМ-1500.
175. Технические характеристики модульного фильтра-адсорбера ФАМ-1500.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ – активная зона
АКРО – аппаратура контроля радиационной обстановки
АСРК – автоматизированная система радиационного контроля
АС – атомная станция
АЭС – атомная электростанция
БЗТ – блок защитных труб
БИЦ – блок индикации
БЩУ – блочный щит управления
ВВЭР – водно-водяной электрический реактор
ВКУ – внутрикорпусные устройства
ГАВ – газоаэрозольные выбросы
ГПД – газовые продукты деления
ГЦН – главный циркуляционный насос
ДК – двуступенчатые или комбинированные фильтры
ИВК – измерительно-вычислительный контур
ИРГ – инертные радиоактивные газы
КГО – контроль герметичности оболочек
КРВП – корабельный радиометр воды и пищи
КРК – корабельный радиометрический комбинированный
ЛФС – лента фильтровальная
МПД – мощность поглощенной дозы
НРБ – Нормы радиационной безопасности
ОРП – основные радиационные параметры
ПА – продукты активации
ПБД – поверхностно-барьерный детектор
ПГ – парогенератор
ПД – продукты деления
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПК – первый контур
РАЗ – радиоактивные аэрозоли
РБГ – радиоактивные благородные газы
РКС – тип радиометра
РЩУ – реакторный щит управления
САОЗ – система аварийного охлаждения зоны
СБТ – счетчик бета-излучения торцовый
СВО – спецводоочистка
СУЗ – система управления защитой
ТВС – тепловыделяющие сборки
Твэлы – тепловыделяющие элементы
ТПК – теплоноситель первого контура
ФМП – фильтрующий материал промышленный
ФП – фильтр Петрянова
ФПА – фильтр Петрянова ацетилцеллюлозный
ФПП – фильтр Петрянова полихлорвиниловый

Приложение 1

Основные характеристики радиоизотопов

Элемент, №	Период полурапада T _{1/2}	Энергия и вид излучения
1	2	3
Америций–241 241Am	433 года	E α = 5,49 (85); E γ = 0,06 (36)
1	2	3
Аргон–41 41Ar	1,83 ч	E β – слаб.; E γ = 1,293 (99)
Барий–131 131Ba	11,8 сут	E γ = 0,124 (28); E γ = 0,216 (19)
Барий–140 140Ba	12,7 сут	E β = 1,02; E γ = 0,537 (34)
Бериллий–7 7Be	53,4 сут	E γ = 0,477(10,3)
Бром–82 82Br	35,3 ч	E β = 0,444; E γ = 0,777 (83); E γ = 0,554 (66)
Висмут–207 207Bi	38 лет	E γ = 0,570 (98); E γ = 1,064 (77)
Висмут–210 210Bi	5,01 сут	E β = 1,160
Висмут–212 212Bi	60,6 мин	E α = 6,05 (25); E β = 2,26 (55); E γ = 0,727(7)
Висмут–214 214Bi	19,9 мин	E β = 3,26; E γ = 0,609 (47); E γ = 1,12 (17)
Вольфрам–185 185W	75 сут	E β = 0,429
Вольфрам–187 187W	23,9 ч	E β = 1,31 (15); E γ = 0,686 (27); E γ = 0,479 (23)
Гадолиний–153 153Gd	242 сут	E γ = 0,099 (55)
Галлий–68 68Ga	68,1 мин	E β = 1,9; E γ = 0,511; E γ = 1,078
Галлий–72 72Ga	14,1 ч	E β = 3,15; E γ = 0,835 (96); E γ = 0,630 (27)
Гафний–181 181Hf	42,4 сут	E β = 1,41; E γ = 0,482 (81); E γ = 0,133 (48)
Гельмий–166 166Ho	26,8 ч	E β = 1,84; E γ — слаб.
Диспрозий–159 159Dy	144 сут	E γ = 0,348; E γ = 0,058 (4)
Европий–152 152Eu	13,3 года	E β = 1,48; E γ = 0,344 (77); E γ = 0,122 (37)
Европий–154 154Eu	8,8 года	E β = 0,87; E β = 1,85 (10); E γ = 0,123 (38); E γ = 1,278(37)
Европий–155 155Eu	4,96 года	E β = 0,25; E γ = 0,087 (32); E γ = 0,105 (20)
Железо–59 59Fe	44,5 сут	E β = 0,475; E γ = 1,095 (56); E γ = 1,292 (44)
Золото–195 195Au	183 сут	E γ = 0,099(10); E γ = 0,129(1)
Золото–198 198Au	2,70 сут	E β = 0,962; E γ = 0,412 (95); E γ = 0,676 (1)
Золото–199 199Au	3,14 сут	E β = 0,46; E β = 0,30; E γ = 0,158 (37); E γ = 0,208 (8)
Индий–113т 113mIn	1,66 ч	E γ = 0,392
Индий–114 114In	71,9 с	E β = 1,988; E γ — слаб.
Индий–114т 114mIn	45,5 сут	E γ = 0,190 (17); E γ = 0,558 (3,5); E γ = 0,724 (3,5)
Иод–125 125I	60,14 сут	E γ = 0,035 (7)
Иод–129 129I	1,57*10 ⁷ лет	E β = 0,150; E γ = 0,040 (9)
Йод–130 130I	12,4 ч	E β = 1,04; E γ = 0,669 (100); E γ = 0,538 (99)
Йод–131 131I	8,04 сут	E β = 0,606 (89); E γ = 0,364 (82);
Иридий–194 194Ir	19,2 ч	E β = 2,24; E γ = 0,368 (10); E γ = 0,64 (1)
Иттербий–169 169Yb	32,0 сут	E γ = 0,063 (45); E γ = 0,198 (35); E γ = 0,177 (22)
Иттрий–90 90Y	64,1 ч	E β = 2,27
Иттрий–91 91Y	58,5 сут	E β = 1,545; E γ — слаб.
Калий–40 40K	1,28*10 ⁹ лет	E β = 1,314(89); E γ = 1,46(10,7)
Калий–42 42K	12,4 ч.	E β = 3,52; E γ = 1,524 (18)
Кальций–45 45Ca	164 сут.	E β = 0,252
Кальций–47 47Ca	4,54 сут.	E β = 1,98(18); E β = 0,67; E γ = 1,308 (74)
Кадмий–109 109Cd	464 сут	E γ = 0,088 (4)
Кадмий–115 115Cd	53,46 ч	E β = 1,11; E γ = 0,53 (26); E γ = 0,49 (10)
Кадмий–115т 115mCd	44,6 сут	E β = 1,62; E γ = 0,935 (1,9)

1	2	3
Кобальт–57 57Co	271 сут	$E\gamma = 0,122$ (86); $E\gamma = 0,136$ (11); $E\gamma = 0,014$ (10)
Кобальт–58 58Co	70,8 сут	$E\gamma = 0,810$ (99); $E\gamma = 0,511$ (30)
Кобальт–60 60Co	5,27 года	$E\beta = 0,314$ (99); $E\gamma = 1,173$ (100); $E\gamma = 1,332$ (100)
Криптон–85 85Kr	10,7 года	$E\beta = 0,67$; $E\gamma$ – слаб.
Ксенон–133 133Xe	5,29 сут	$E\beta = 0,346$; $E\gamma = 0,081$ (37)
Лантан–140 140La	40,3 ч	$E\beta = 2,175$ (6); $E\beta = 1,69$ (15); $E\beta = 1,36$; $E\gamma = 1,596$ (96)
Лютеций–177 177Lu	6,71 сут.	$E\beta = 0,497$; $E\gamma = 0,208$ (6,1); $E\gamma = 0,113$ (2,8)
Магний–28 28Mg	21,1 ч.	$E\beta = 0,9$; $E\beta = 0,46$; $E\gamma = 0,031$ (96); $E\gamma = 1,35$ (70)
Марганец–54 54Mn	313 сут.	$E\gamma = 0,835$ (100)
Медь–64 64Cu	12,7 ч.	$E\beta = 0,573$ (38); $E\beta = 0,656$ (19); $E\gamma = 0,511$ (38)
Молибден–99 99Mo	66,0 ч.	$E\beta = 1,23$; $E\gamma = 0,704$ (12); $E\gamma = 0,181$ (7)
Мышьяк–74 74As	17,78 сут	$E\beta = 1,36$ (32); $E\beta = 0,95$ (26); $E\gamma = 0,596$ (61); $E\gamma = 0,511$ (59)
Мышьяк–76 76As	26,32 ч	$E\beta = 2,97$ (32); $E\gamma = 0,559$ (43); $E\gamma = 0,657$ (6)
Мышьяк–77 77As	38,83 ч	$E\beta = 0,68$; $E\gamma = 0,239$ (2,5)
Натрий–22 22Na	2,60 года	$E\beta = 0,545$; $E\gamma = 0,511$ (180); $E\gamma = 1,275$ (100)
Натрий–24 24Na	15,0 ч	$E\beta = 1,389$ (100); $E\gamma = 1,369$ (100); $E\gamma = 2,754$ (100)
Неодим–147 147Nd	11 сут	$E\beta = 0,9$; $E\beta = 0,81$; $E\gamma = 0,091$ (28); $E\gamma = 0,533$ (13)
Никель–63 63Ni	100 лет	$E\beta = 0,067$
Ниобий–95 95Nb	35 сут	$E\beta = 0,160$; $E\gamma = 0,765$ (99,8)
Осмий–191 191Os	15,4 сут	$E\beta = 0,143$; $E\gamma = 0,129$ (25)
Палладий–103 103Pd	16 сут	$E\gamma = 0,362$ (0,06)
Палладий–109 109Pd	13,5 ч	$E\beta = 1,028$; $E\gamma = 0,088$ (5)
Плутоний–238 238Pu	87,7 года	$E\alpha = 5,50$ (72); $E\alpha = 5,46$ (28); $E\gamma$ – слаб.
Плутоний–239 239Pu	24119 лет	$E\alpha = 5,15$ (88); $E\alpha = 5,10$ (11,5); $E\gamma = 0,039$ (0,007); $E\gamma = 0,052$ (0,020); $E\gamma = 0,129$ (0,005); $E\gamma = 0,375$ (0,0012); $E\gamma = 0,414$ (0,0012)
Полоний–210 210Po	138 сут	$E\alpha = 5,305$ (100); $E\gamma$ – слаб.
Полоний–216 216Po	0,15 с	$E\alpha = 6,78$ (100)
Полоний–218 218Po	3,05 мин	$E\alpha = 6,00$ (100)
Празеодим–142 142Pr	19,1 ч	$E\beta = 2,16$; $E\gamma = 1,57$ (3,7)
Празеодим–143 143Pr	13,6 сут	$E\beta = 0,933$
Празеодим–144 144Pr	17,3 мин	$E\beta = 2,99$; $E\gamma = 0,695$ (1,5)
Прометий–147 147Pm	2,62 года	$E\beta = 0,224$
Протактиний–233 233Pa	27 сут	$E\beta = 0,568$ (5); $E\gamma = 0,31$ (44)
Протактиний–234 234Pa	6,7 ч	$E\beta = 1,13$ (13); $E\gamma = 0,90$ (70); $E\gamma = 0,100$ (50)
Радий–226 226Ra	1600 лет	$E\alpha = 4,78$ (95); $E\gamma = 0,186$ (4)
Радон–220 220Rn	55,6 с	$E\alpha = 6,29$ (100); $E\gamma = 0,55$ (0,07)
Радон–222 222Rn	3,82 сут	$E\alpha = 5,49$ (100); $E\gamma = 0,510$ (0,07)
Рений–186 186Re	90,6 ч	$E\beta = 1,07$; $E\gamma = 0,137$ (9)
Родий–106 106Rh	28,8 с	$E\beta = 3,54$; $E\gamma = 0,512$ (21); $E\gamma = 0,622$ (11)
Рубидий–86 86Rb	18,7 сут	$E\beta = 1,78$; $E\gamma = 1,078$ (8,8)
Рубидий–87 87Rb	4,8*1010 лет	$E\beta = 0,274$
Рутений–97 97Ru	2,9 сут	$E\gamma = 0,215$ (91); $E\gamma = 0,324$ (8)
Рутений–106 106Ru	372 сут	$E\beta = 0,039$
Ртуть–197 197Hg	64,1 ч	$E\gamma = 0,077$ (18); $E\gamma = 0,191$ (2)
Ртуть–197т 197mHg	28,8 ч	$E\gamma = 0,134$ (42); $E\gamma = 0,279$ (7)
Ртуть–203 203Hg	46,6 сут	$E\beta = 0,214$; $E\gamma = 0,278$ (81,5)

1	2	3
Самарий–151 151Sm	90 лет	$E\beta = 0,076$; $E\gamma = 0,022$ (4)
Самарий–153 153Sm	46,7 ч	$E\beta = 0,80$; $E\gamma = 0,103$ (28)
Селен–75 75Se	120 сут	$E\gamma = 0,265$ (60); $E\gamma = 0,136$ (57)
Серебро–110 110Ag	24,6 с	$E\beta = 2,87$; $E\gamma = 0,658$ (4,5)
Серебро–110т 110mAg	250 сут	$E\gamma = 0,658$ (96); $E\gamma = 0,885$ (71); $E\gamma = 1,384$ (21)
Серебро–111 111Ag	7,45 сут	$E\beta = 1,05$; $E\gamma = 0,342$ (6)
Сера–35 35S	87,2 сут	$E\beta = 2,3$; $E\gamma = 1,57$
Свинец–210 210Pb	22,3 года	$E\beta = 0,061$; $E\gamma = 0,047$ (4)
Свинец–212 212Pb	10,64 ч	$E\beta = 0,346$ (81); $E\beta = 0,586$ (14); $E\gamma = 0,239$ (47)
Свинец–214 214Pb	26,8 мин	$E\beta = 0,65$ (50); $E\gamma = 0,352$ (36); $E\gamma = 0,295$ (19)
Скандий–46 46Sc	83,8 сут	$E\beta = 0,357$; $E\gamma = 0,889$ (100); $E\gamma = 1,120$ (100)
Стронций–85 85Sr	64,8 сут	$E\gamma = 0,514$ (100)
Стронций–87т 85mSr	2,81 ч	$E\gamma = 0,388$ (80)
Стронций–89 89Sr	50,6 сут	$E\beta = 1,46$; $E\gamma$ – слаб.
Стронций–90 90Sr	28,6 лет	$E\beta = 0,546$
Сурьма–122 122Sb	2,7 сут	$E\beta = 2,0$; $E\beta = 1,4$; $E\gamma = 0,564$ (66);
Сурьма–124 124Sb	60,2 сут	$E\beta = 2,31$; $E\gamma = 0,603$ (97); $E\gamma = 1,691$ (50)
Сурьма–125 125Sb	2,73 года	$E\beta = 0,61$; $E\gamma = 0,427$ (31); $E\gamma = 0,599$ (24)
Таллий–204 204Tl	3,78 года	$E\beta = 0,766$
Тантал–182 182Ta	115 сут	$E\beta = 0,522$; $E\gamma = 0,068$ (42); $E\gamma = 1,121$ (34)
Теллур–132 132Te	78,2 ч	$E\beta = 0,22$; $E\gamma = 0,230$ (90); $E\gamma = 0,053$ (17)
Тербий–160 160Tb	72,3 сут	$E\beta = 0,86$; $E\gamma = 0,603$ (97); $E\gamma = 1,691$ (50)
Технеций–99 99Tc	2,13*10 ⁵ лет	$E\beta = 0,292$
Технеций–99т 99mTc	6,02 ч	$E\gamma = 0,1426$ (90)
Титан–44 44Ti	47,3 года	$E\beta = 1,04$; $E\gamma = 0,078$ (98); $E\gamma = 0,068$ (90)
Торий–232 232Th	14,1*10 ⁹ лет	$E\alpha = 4,01$ (77); $E\alpha = 3,95$ (23)
Тритий –3 3H	12,4 года	$E\beta = 0,005$
Тулий–170 170Tm	129 сут	$E\beta = 0,97$; $E\gamma = 0,084$ (3,3)
Уран–234 234U	2,45*10 ⁵ лет	$E\alpha = 4,77$ (72); $E\alpha = 4,72$ (28); $E\gamma = 0,053$ (0,2)
Уран–235 (6) 235U	7,038*10 ⁸ лет	$E\alpha = 4,58$ (8); $E\alpha = 4,40$ (62); $E\alpha = 4,36$ (18); $E\alpha = 4,22$ (6);
Уран–238 238U	4,468*10 ⁹ лет	$E\alpha = 4,20$ (77); $E\alpha = 4,15$ (23)
Углерод–14 14C	5730 лет	$E\beta = 0,156$
Фосфор–32 32P	14,7 сут	$E\beta = 1,710$
Хлор–36 36Cl	3,01*10 ⁵ лет	$E\beta = 0,714$; $E\gamma$ –слаб.
Хром–51 51Cr	27,7 сут	$E\gamma = 0,320$ (10)
Цезий–134 134Cs	2,06 года	$E\beta = 0,662$ (70); $E\gamma = 0,796$ (99); $E\gamma = 0,605$ (98)
Цезий–137 137Cs	30,0 лет	$E\beta = 1,176$ (5); $E\beta = 0,514$ (95); $E\gamma = 0,662$ (85)
Церий–141 141Ce	32,5 сут	$E\beta = 0,581$; $E\gamma = 0,145$ (48)
Церий–144 144Ce	285 сут	$E\beta = 0,31$; $E\gamma = 0,134$ (11)
Цинк–65 65Zn	241 сут	$E\gamma = 1,115$ (49); $E\gamma = 0,511$ (3,4)
Цинк–69 69Zn	55,6 мин	$E\beta = 0,90$
Цирконий–95 95Zr	64 сут	$E\beta = 0,396$; $E\gamma = 0,724$ (49); $E\gamma = 0,756$ (49)
Эрбий–169 169Er	9,4 сут	$E\beta = 0,34$; $E\gamma$ – слаб.

Приложение 2

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО РАДИОНУКЛИДАМ

Радиационные характеристики продуктов деления

E_{γ} , МэВ	Выход гамма-квантов на 100 распадов, %	E_{γ} , МэВ	Выход гамма-квантов на 100 распадов, %
1	2	3	4
$^{85m}_{36}\text{Kr}$, $T_{1/2} = 4,48$ ч		0,41142	2,9
0,30447	14,1	0,35606	4,7
0,1510	75,3	0,22090	22,5
$^{85}_{36}\text{Kr}$, $T_{1/2} = 10,71$ года		0,19746	2,1
0,51397	0,435	$^{88}_{37}\text{Rb}$, $T_{1/2} = 17,8$ мин	
$^{87}_{36}\text{Kr}$, $T_{1/2} = 76,31$ мин		2,57014	10,8
2,5577	4,3	2,19600	15,2
2,5545	8,65	1,53808	2,8
2,0119	2,89	1,24810	46,7
0,8456	7,25	1,03188	64,1
0,4027	48,30	0,94769	10,1
$^{88}_{36}\text{Kr}$, $T_{1/2} = 2,84$ ч		0,65771	10,9
2,3920	37,8	$^{89}_{38}\text{Sr} + ^{89}_{38}\text{Y}$, $T_{1/2} = 50,55$ сут (16,06с)	
2,2316	3,6	0,9091	0,015
2,1959	14,9	$^{90}_{36}\text{Kr}$, $T_{1/2} = 32,32$ с	
2,0353	4,8	1,7800	9,6
2,0295	4,8	1,5521	3,1
1,5298	11,3	1,5377	13,2
0,8347	13,0	1,4237	3,7
0,3626	3,0	1,1187	53,0
0,1961	37,8	0,5545	6,5
0,1660	6,8	0,5398	38,0
0,0280	2,1	0,4341	3,2
$^{88}_{37}\text{Rb}$, $T_{1/2} = 17,8$ мин		0,2490	3,0
2,6780	2,58	0,2419	16,8
1,83613	23,0	0,2341	4,5
0,89801	11,6	0,1215	53,7
$^{89}_{36}\text{Kr}$, $T_{1/2} = 3,07$ мин		$^{90}_{37}\text{Rb}$, $T_{1/2} = 153$ с	
2,86623	2,0	4,6466	2,9
1,69370	4,9	4,3660	9,9
1,53368	5,8	4,1360	9,2
1,53004	3,7	3,5342	5,5
1,47276	7,7	3,8333	8,6
1,32428	3,4	1,0606	12,5
1,10778	3,3	0,8315	62
0,90427	8,1	$^{91}_{38}\text{Sr} + ^{91m}_{39}\text{Y}$, $T_{1/2} = 9,75$ ч (49,7 мин)	
0,86708	6,7	1,0243	36,0
0,73839	4,7	0,9258	4,2
0,58580	18,6	0,7498	25,0
0,57696	6,3	0,6529	8,2
0,49751	7,5	0,6523	3,1
0,55557	63,0	1,56	11
$^{91}_{39}\text{Y}$, $T_{1/2} = 58,51$ сут		1,38	9
1,480	0,17	1,28	3

1,210	0,30	1,18	11
$^{92}_{38}\text{Sr}$, $T_{1/2}=2,71$ ч		1,02	25
1,37	90,0	0,89	15
0,44	4,0	0,704	11
0,23	3,0	0,59	24
$^{92}_{39}\text{Y}$, $T_{1/2} = 3,53$ ч		0,510	16
1,4054	4,75	0,40	2,3
0,9245	13,8	0,300	7,0
0,5611	2,39	0,193	3,4
1	2	3	4
0,4485	2,32	0,191	21,3
$^{93}_{39}\text{Y}$, $T_{1/2}=10,1$ ч		0,080	3,0
1,9142	1,67	$^{101}_{43}\text{Tc}$, $T_{1/2}=14,2$ мин	
0,9471	1,92	0,5446	4,8
0,2670	7,0	0,3067	90,0
$^{95}_{39}\text{Y}$, $T_{1/2}=10,3$ мин		0,1840	1,4
3,576	2,0	0,1271	1,5
2,1758	2,80	$^{103}_{44}\text{Ru} + ^{103m}_{45}\text{Rh}$, $T_{1/2} = 39,35$ сут (56,116 мин)	
1,6736	3,30	0,61029	5,85
1,3229	2,1	0,497080	90,0
0,95637	7,4	$^{105}_{44}\text{Ru} + ^{105m}_{45}\text{Rh}$, $T_{1/2} = 4,44$ ч (45 с)	
$^{95}_{40}\text{Zr}$, $T_{1/2} = 65,05$ сут		0,9694	2,34
0,756715	55,4	0,8758	3,40
0,724184	43,7	0,7245	49,0
$^{95}_{40}\text{Zr} + ^{95m}_{41}\text{Nb}$, $T_{1/2} = 64,04$ сут (3,61 сут)		0,6764	16,7
0,756715	55,4	0,6561	2,4
0,724184	43,7	0,4694	17,5
$^{95}_{41}\text{Nb}$, $T_{1/2} = 34,97$ сут		0,4135	2,48
0,76584	99,80	0,3934	4,2
$^{97}_{40}\text{Zr} + ^{97m}_{41}\text{Nb}$, $T_{1/2} = 17$ ч (1 мин)		0,3165	11,7
1,14795	2,69	0,2629	7,2
0,74396	92,5	0,1297	5,0
0,50763	5,15	$^{105}_{45}\text{Ru}$, $T_{1/2}=36,36$ ч	
0,35539	2,40	0,3139	0,3139
$^{97}_{41}\text{Nb}$, $T_{1/2}=72,1$ мин			0,3063
0,65792	98,0	$^{106}_{44}\text{Ru} + ^{106}_{45}\text{Rh}$, $T_{1/2} = 368$ сут (29,9 с)	
$^{99}_{42}\text{Mo} + ^{99m}_{43}\text{Tc}$, $T_{1/2} = 66,02$ ч (6,006 ч)			0,6221
2,08	16	0,5118	0,5118
1,66	3		
Ag , $T_{1/2} = 250,4$ сут		0,183	1,6
1,5050	14,5	0,1497	24,0
1,4755	4,5	0,1023	9,2
1,3840	26,8	0,0809	4,1
0,9375	32,4	$^{131}_{52}\text{Te}$, $T_{1/2}=25,0$ мин	
0,8845	76,4	1,1474	5,6
0,8180	7,1	0,9974	3,6
0,7635	21,3	0,9485	2,2
0,7440	3,9	0,6022	4,8
0,7065	15,6	0,4928	5,1
0,6868	7,1	0,4524	17,9

0,6775	12,7	0,1498	67,2
0,6577	94,2	$^{131}_{53}\text{I}$, $T_{1/2} = 8,04$ сут	
0,6202	2,5	0,72291	1,63
0,4478	2,8	0,6369	6,9
1	2	3	4
$^{124}_{51}\text{Sb}$, $T_{1/2} = 60,20$ сут		0,36449	82,4
2,091	5,61	0,284312	5,8
1,691	49,0	0,080	2,45
1,3682	2,36	$^{131m}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 11,9$ сут	
0,72278	11,3	0,16397	1,70
0,71382	2,4	$^{132}_{52}\text{Te}$, $T_{1/2} = 78,2$ ч	
0,64582	7,23	0,2282	85,0
0,60272	98,3	0,11630	1,9
$^{131m}_{52}\text{Te}$, $T_{1/2} = 30$ ч		0,11176	1,8
1,2065	8,2	0,0497	13,0
1,1485	3,3	$^{132}_{53}\text{I}$, $T_{1/2} = 2,30$ ч	
1,1255	10,3	1,39857	7,1
0,910	3,0	1,37207	2,5
0,8521	18,1	1,13603	3,0
0,8221	4,7	0,95455	18,0
0,7936	11,2	0,8122	5,6
0,7827	6,9	0,8098	2,9
0,7737	32,7	0,77261	76,0
0,665	2,8	0,6716	5,2
0,4626	2,0	0,66998	4,9
0,4527	5,1	0,66769	98,5
0,3345	8,6	0,6506	2,7
0,2795	2,2	0,63022	13,7
0,2406	7,8	0,52265	16,1
02007	6,8	0,5059	5,0
0,189	2,5		
$^{133}_{52}\text{Te}$, $T_{1/2} = 12,45$ мин		0,88405	65,1
1,7175	3,5	0,85725	6,42
1,3334	10,2	0,84695	95,6
1,0210	2,8	0,6774	7,49
1,0003	6,4	0,6216	10,58
0,9311	4,6	0,5952	11,03
0,8445	3,3	0,54065	7,554
0,7874	5,7	0,4053	7,36
0,7201	6,8	0,13444	4,75
0,4079	30,8	$^{134}_{55}\text{Cs}$, $T_{1/2} = 2,062$ года	
0,3121	72,5	1,36519	3,2
$^{133}_{53}\text{I}$, $T_{1/2} = 20,8$ ч		1,1677	1,88
1,2989	2,1	1,03838	1,02
0,8753	4,3	0,8027	8,8
0,5295	85,0	0,79584	85,1
$^{133m}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 2,19$ сут		0,60464	97,54
0,2329	10,3	0,56935	15,0
$^{133}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 5,245$ сут		0,56320	8,4
0,0810	100	$^{135}_{53}\text{I} + ^{135m}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 6,61$ ч (15,6 мин)	
$^{134}_{52}\text{Te}$, $T_{1/2} = 41,8$ мин		1,7915	8,35

1	2	3	4
0,7667	27	1,7067	4,32
1,6783	10,0	1,6783	10,0
0,7125	14	1,4581	9,16
0,5656	5,1	1,2605	29,4
0,4644	4,3	1,1316	22,2
0,4607	8,9	1,1241	3,91
0,4348	18	1,0388	7,8
0,2781	20,0	0,8368	5,99
0,2108	2,3	0,5465	6,39
0,2015	8,4	0,5265	11,4
0,1811	18	0,4175	3,14
0,0795	21	0,2886	3,18
$^{134}_{53}\text{I} + ^{134m}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 3,56$ мин (29 с)			0,2205
0,2719	79,0	$^{135m}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 15,65$ мин	
0,0444	10,3	0,5265	80,0
$^{134}_{53}\text{I}$, $T_{1/2} = 52,6$ мин			
1,8061	5,76	0,6086	2,38
1,6137	4,59	0,2498	90,5
1,1366	8,15	$^{136}_{55}\text{Cs} + ^{136m}_{56}\text{Ba}$, $T_{1/2} = 12,98$ сут (0,306 с)	
1,07285	14,95	1,2351	20,4
0,9746	4,75	1,0477	80,0
0,8183	99,5	$^{140}_{56}\text{Ba}$, $T_{1/2} = 12,789$ сут	
0,3400	42,8	0,53725	23,8
0,2733	11,2	0,43754	1,86
0,1762	12,5	0,423695	3,090
0,1637	4,1	0,304845	4,1
0,1528	7,3	0,162656	5,95
0,0861	5,2	0,0300	13,1
0,668	10,0	$^{140}_{57}\text{La}$, $T_{1/2} = 40,22$ ч	
$^{137}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 3,83$ мин		2,5217	3,44
0,456	30,0	1,59649	95,47
$^{137}_{55}\text{Cs} + ^{137m}_{56}\text{Ba}$, $T_{1/2} = 30,174$ года (2,552 мин)		0,92524	6,80
0,66164	85,1	0,91963	2,53
$^{138}_{54}\text{Xe}$, $T_{1/2} = 4,13$ мин		0,86782	5,35
2,2522	2,1	0,81585	22,52
2,0157	11,20	0,751826	4,22
2,0046	4,71	0,487029	43,43
1,7681	16,60	0,432530	2,79
0,4345	20,20	0,328768	18,5
0,4013	2,20	$^{141}_{57}\text{La}$, $T_{1/2} = 3,93$ ч	
0,3965	6,50	1,37	2,0
0,2583	3250	$^{141}_{58}\text{Ce}$, $T_{1/2} = 32,50$ сут	
0,2426	3,80	0,145450	49,0
0,1539	5,70	$^{142}_{57}\text{La}$, $T_{1/2} = 92,7$ мин	
$^{138}_{55}\text{Cs}$, $T_{1/2} = 33,41$ мин		2,9720	3,3
2,6393	7,68	2,54265	11,2
1	2	3	4
2,2180	16,4	2,39772	16,4
1,4537	74,6	2,1872	5,8
1,0097	28,0	2,05517	2,9
0,8717	4,7	1,90132	8,7
0,5470	9,7	1,75642	3,3

0,4627	27,0	1,5458	3,3
0,4090	4,2	1,36295	2,4
0,1377	2,8	1,23311	2,05
$^{138m}_{55}\text{Cs}$, $T_{1/2} = 2,90$ мин			1,04368
1,4360	25,0	1,0114	4,4
0,4630	24,6	0,89485	9,4
0,1917	20,0	0,64117	52,5
0,1125	2	$^{143}_{53}\text{Pr}$, $T_{1/2} = 13,58$ сут	
$^{139}_{56}\text{Ba}$, $T_2 = 84,9$ мин			0,742
0,1658	22,6	$^{143}_{58}\text{Ce}$, $T_{1/2} = 33,0$ ч	
		0,72196	5,04
0,66455	5,16	0,1342	6,53
0,350587	3,30	0,0720	8,60
0,293262	41,3	$^{226}_{88}\text{Ra}$, $T_{1/2} = 1600$ лет	
0,057365	11,6	2,2041	5,3
$^{144}_{58}\text{Ce} + ^{144m}_{59}\text{Pr} + ^{144}_{59}\text{Pr}$, $T_{1/2} = 284,31$ сут (7,2 мин; 17,30 мин)		1,8474	2,2
0,6965	1,34	1,7645	16,6
0,1335	11,1	1,7296	3,07
0,0801	1,60	1,5092	2,3
$^{58144}_{58}\text{Ce}$, $T_{1/2} = 284$ сут		1,4080	2,6
0,1335	10,8	1,3776	4,18
0,0801	1,54	1,2381	6,8
$^{152}_{63}\text{Eu}$, $T_{1/2} = 13,2$ года		1,1203	16,0
1,40808	20,6	0,9341	3,34
1,11207	13,3	0,7684	5,32
1,08580	10,0	0,60919	48,4
0,96401	14,2	0,35196	39,3
0,86739	4,06	0,29520	20,1
0,77890	12,8	0,24200	7,8
0,4440	3,18	0,18610	4,0
0,41109	2,26	$^{237}_{92}\text{U}$, $T_{1/2} = 6,75$ сут	
0,34430	27,4	0,2080	22,4
0,24467	7,76	0,059536	34,6
0,12178	30,8	0,026348	2,32
$^{187}_{74}\text{W}$, $T_{1/2} = 23,9$ ч		$^{239}_{93}\text{Np}$, $T_{1/2} = 2,355$ сут	
0,7731	4,11	0,27762	14,5
0,6859	27,1	0,22820	11,4
0,6181	6,31	0,20976	3,42
0,5517	5,01	0,10614	27,8
0,4796	21,5		
Примечание. $T_{1/2}$ – период полураспада радионуклида; его значение в скобках для дочернего радионуклида приведено в скобках.			

Приложение 3

Основные ядерно-физические характеристики радионуклидов – продуктов активации [14]

Характеристики ядра-излучателя				Реакция активации	Содержание исходного нуклида в природной смеси, %	Сечение активации σ_a , 10^{-24} см ²
Нуклид-излучатель	Период полураспада, T _{1/2}	Энергия γ -квантов, МэВ	Выход γ -квантов на 100 распадов, %			
1	2	3	4	5	6	7
³ H	12,26 лет	β -излучатель $E_\beta = 0,0186$ МэВ	100	² H(n, γ) ³ H	0,015	0,57·10 ⁻³ (а)
				³ He(n, p) ³ H	0,00013	5400
				⁶ Li(n, α) ³ H	7,52	945
				³ Li(n, n', ⁴ He) ³ H	92,48	0,02(б)
				¹⁰ B(n, 2 α) ³ H	18,8	0,02
⁷ ₄ Be	53,3 сут	0,47756	10,3			
¹³ ₇ N	9,97 мин	0,511	199,62	¹⁶ O(p, n) ¹³ N	99,7600	4·10 ⁻⁸ (б)
				¹⁴ N(n, 2n) ¹³ N		
¹⁴ ₆ C	5568 лет	β -излучатель $E_\beta = 0,158$ МэВ	100	¹⁴ N(n, p) ¹⁴ C	99,63	1,75 (а)
				¹⁷ O(n, α) ¹⁴ C	0,037	40·10 ⁻³ (а)
¹⁶ ₇ N	7,11	7,112	1	¹⁶ O(n, p) ¹⁶ N	99,776	1,9·10 ⁻⁵ (б)
		2,75		¹⁵ O(n, γ) ¹⁶ N	0,37	2,4·10 ⁻⁵
¹⁷ ₇ N	4,174с	2,19	0,5	¹⁷ O(n, p) ¹⁷ N	0,037	5,2·10 ⁻⁶ (б)
		0,871	3,1			
		n-излучатель $E_n \approx 1$ МэВ				
¹⁸ ₉ F	109,8 мин	0,511	193,4	¹⁸ O(n, p) ¹⁸ F	0,204	8·10 ⁻⁶ (б)
¹⁹ ₈ O	26,9 с	1,56	1,44	¹⁸ O(n, p) ¹⁸ O	0,2000	2,2·10 ⁻⁴ (а)
		1,454	3,12			
		1,363	55,4			
		0,197	95,6			
²² ₁₁ Na	2,602 года	1,27454	99,95	²³ Na(n, 2n) ²² Na	100	6·10 ⁻⁶ (б)
		0,511	181,1			
²³ ₁₀ Ne	37,6 с	1,63	0,83	²³ Na(n, p) ²³ Ne	100	1·10 ⁻³ (б)
		0,439	32	²² Ne(n, γ) ²³ Ne	8,82	3,6·10 ⁻² (а)
²⁴ ₁₁ Na	15,005	2,75403	99,87	²³ Na(n, γ) ²⁴ Na	100	0,53 (а)
		1,36854	99,994	²⁷ Al(n, α) ²⁴ Na	100	0,57·10 ⁻³ (б)
				²⁴ Mg(n, p) ²⁴ Na	28,6	1,2·10 ⁻³ (б)
²⁵ ₁₁ Na	60 с	1,6117	9,5	²⁵ Mg(n, γ) ²⁵ Na	10,1	2·10 ⁻³ (б)
		0,97471	14,5			
		0,58506	12,6			
²⁷ ₁₁ Mg	9,46 мин	1,01443	28,5	²⁶ Mg(n, γ) ²⁷ Mg	11,3	0,027 (а)
		0,84376	71,5	²⁷ Al(n, p) ²⁷ Mg	100	3,1·10 ⁻³ (б)
		0,17068	0,77			
²⁸ ₁₃ Al	2,24 мин	1,7787	100	²⁷ Al(n, γ) ²⁸ Al	100	0,21 (а)
				²⁸ Si(n, p) ²⁸ Al	92,3	4·10 ⁻³ (б)
²⁹ ₁₃ Al	6,52 мин	2,426	6,8	²⁹ Si(n, p) ²⁹ Al	4,68	2,7·10 ⁻³ (б)
		2,028	4,1			

		1,273	89,1			
³¹ ₁₄ Si	2,62 ч	1,27	0,07	³⁰ Si(n, γ) ³¹ Si	3,1	0,11
³⁸ ₁₇ Cl	37,18 мин	2,1675	44,0	³⁷ Cl(n, γ) ³⁸ Cl	24,5	0,56 (a)
		1,6424	32,8			
⁴¹ ₁₈ Ar	1,83 ч	1,2936	99,1	⁴⁰ Ar(n, γ) ⁴¹ Ar	99,6	0,53 (a)
⁴² ₁₉ K	12,36 ч	1,5246	17,9	⁴¹ K(n, γ) ⁴² K	6,91	1,15 (a)
		0,3126	0,33			
⁴⁶ ₂₁ Sc	83,8 сут	1,1205	100	⁴⁶ Ti((n,p) ⁴⁶ Sc	7,95	4,1·10 ⁻³ (б)
		0,88925	100			
⁴⁷ ₂₁ Sc	3,4 сут	0,1594	70	⁴⁷ Ti((n,p) ⁴⁷ Sc	7,95	2,1·10 ⁻⁴ (б)
⁴⁷ ₂₀ Ca	4,55 сут	1,2971	75	⁴⁶ Ca(n, γ) ⁴⁷ Ca	3,3 ·10 ⁻³	0,25 (a)
		0,8079	6,8			
		0,4892	6,8			
⁴⁸ ₂₁ Sc	43,8 ч	1,3114	100	⁴⁸ Ti((n,p) ⁴⁸ Sc	73,5	7,7·10 ⁻⁵ (б)
		1,2123	2,5	⁵¹ V(n, α) ⁴⁸ Sc	99,8	8,0·10 ⁻⁵ (б)
		1,0371	98			
		0,9833	100			
		0,1733	9,4			
⁴⁹ ₂₀ Ca	8,72 мин	4,0719	7	⁴⁹ Ca (n, γ) ⁴⁹ Ca	0,185	1,1 (a)
		3,0844	92,1			
		1,4089	0,63			
⁵¹ ₂₂ Ti	5,80 мин	0,928	4,6	⁵⁰ Ti ((n, γ) ⁵¹ Ti	5,3	0,14 (a)
		0,605	1,4			
		0,319	95,4			
⁵¹ ₂₄ Cr	27,73 сут	0,32007	9,83	⁵⁰ Cr (n, γ) ⁵¹ Cr	4,31	13,5 (a)
				⁵⁴ Fe (n, α) ⁵¹ Cr		8,5·10 ⁻⁴ (б)
⁵² ₂₃ V	3,760 мин	1,4339	100	⁵¹ V(n, γ) ⁵² V	99,8	4,5 (a)
		1,3334	0,60			
⁵⁴ ₂₅ Mn	312,3 сут	0,83481	99,978	⁵⁴ Fe (n,p) ⁵⁴ Mn	5,81	0,085 (б)
⁵⁶ ₂₅ Mn	2,578 ч	2,523	1,0	⁵⁵ Mn (n, γ) ⁵⁶ Mn	100	13,4 (a)
		2,1124	14	⁵⁶ Mn (n, p) ⁵⁶ Mn	91,6	1,2·10 ⁻³ (б)
		1,8112	27	⁵⁹ Co (n, α) ⁵⁶ Mn	100	1,4 ·10 ⁻⁴ (б)
		0,84664	99			
⁵⁸ ₂₇ Co	70,78 сут	0,81075	99,45	⁵⁸ Ni(n, p) ⁵⁸ Co		0,1033 (б)
		0,511	30,0			
⁵⁹ ₂₆ Fe	45,1 сут	1,29158	44,1	⁵⁸ Fe (n, γ) ⁵⁹ Fe	0,31	1,0 (a)
		1,09927	55,5			
		0,19223	2,95			
		0,14254				
⁶⁰ ₂₇ Co	5,272 года	1,33251	99,98	⁵⁹ Co (n, γ) ⁶⁰ Co	100	36,3 (a)
		1,17322	99,87	⁶⁰ Ni(n, p) ⁶⁰ Co	26,2	< 2·10 ⁻³ (б)
1	2	3	4	5	6	7
				⁶³ Cu (n, α) ⁶⁰ Co	69,1	7,2·10 ⁻⁴ (б)
⁶⁴ ₂₉ Cu	12,71 ч	1,347	0,55	⁶³ Cu (n, α) ⁶⁴ Cu	69,1	3,9 (a)
		0,511	37	⁶⁴ Zn(n, p) ⁶⁴ Cu	48,9	0,035 (a)
⁶⁵ ₃₀ Zn	244,1 сут	1,11545	50,6	⁶⁴ Zn (n, γ) ⁶⁵ Zn	48,9	0,47 (a)
		0,511	2,82			
⁶⁵ ₂₈ Ni	2,520 ч	1,480	25,9	⁶⁸ Zn (n, α) ⁶⁵ Ni	18,6	2·10 ⁻⁵ (б)
		1,1151	15,2			
		0,366	4,8			
⁶⁶ ₂₉ Cu	5,1 мин	1,0392	8,95	⁶⁵ Cu(n, γ) ⁶⁶ Cu	30,9	1,8 (a)

⁶⁷ ₂₉ Cu	61,88 ч	0,18453	47	⁶⁷ Zn(n, p) ⁶⁷ Cu	4,11	2,7·10 ⁻⁴ (б)
		0,090325	16,9			
		0,09126	7,29			
^{69m} ₃₀ Zn	14,0 ч	0,4391	95,7	⁶⁸ Zn(n, γ) ^{69m} Zn	18,6	0,097 (а)
⁸⁹ ₄₀ Zr+	78,43 ч	1,712	0,86	⁹² Mo(n, α) ⁸⁹ Zr+	15,9	1,7·10 ⁻⁵ (б)
^{89m} ₃₉ Y	16,06 с	0,9091	99,86	^{89m} Y		
		0,511	50,6			
^{92m} ₄₁ Nb	10,13 сут	1,82	0,86	⁹² Mo(n, p) ^{92m} Nb	15,9	1,3·10 ⁻³ (б)
		0,934	99,1			
		0,89	1,84			
^{93m} ₄₂ Mo	6,85 ч	1,4772	99,4	⁹² Mo (n, γ) ^{93m} Mo	15,9	< 0,006 (а)
		0,68464	92			
		0,26323	61,3			
		0,11392	0,71			
^{94m} ₄₁ Nb	6,26	0,871	0,201	⁹³ Nb(n, γ) ^{94m} Nb	100	1,00 (а)
⁹⁵ ₄₀ Zr +	64,05 сут	0,756715	55,4	⁹⁴ Zn(n, γ) ⁹⁵ Zr+	17,4	0,09 (а)
^{95m} ₄₁ Nb	3,61 сут	0,724184	43,7	^{95m} Nb		
⁹⁵ ₄₁ Nb	34,97 сут	0,76584	99,80	Mo(n, p) ⁹⁵ Nb	15,7	< 1·10 ⁻⁴ (б)
⁹⁷ ₄₀ Zr +	17 ч	См. табл. 1 ниже		⁹⁶ Zr(n, γ) ⁹⁷ Zr+	2,8	0,1 (а)
⁹⁷ ₄₁ Nb	1 мин			⁹⁷ Nb		
⁹⁹ ₄₂ Mo +	66,02	См. табл. 1 ниже		⁹⁸ Mo(n, γ) ⁹⁹ Mo+	23,8	0,5 (а)
^{99m} ₄₃ Tc	6,006 ч			^{99m} Tc		
¹⁰¹ ₄₂ Mo	14,62 мин	См. табл. 1 ниже		¹⁰⁰ Mo(n, γ) ¹⁰¹ Mo	9,62	0,2 (а)
¹⁰⁸ ₄₇ Ag	2,41 мин	0,63289	1,8	¹⁰⁷ Ag (n, γ) ¹⁰⁸ Ag	51,35	45 (а)
1	2	3	4	5	6	7
^{110m} ₄₇ Ag	250,4 сут	См. табл. 1 ниже		¹⁰⁹ Ag (n, γ) ^{110m} Ag	48,65	2,8 (а)
¹¹³ ₅₀ Sn	115,2	0,25504	1,5	¹¹² Sn (n, γ) ¹¹³ Sn	0,95	1,3 (а)
¹²² ₅₁ Sb	2,714 сут	1,1402	2,4	¹²¹ Sb (n, γ) ¹²² Sb	57,3	6,4 (а)
		0,6928	3,9			
		0,5640	70,9			
^{113m} ₅₀ Sn	42 мин	0,1597	86	¹²² Sn (n, γ) ^{123m} Sn	4,71	0,16 (а)
¹²⁴ ₅₁ Sb	60,20 сут	См. табл. 1 ниже		¹²³ Sb (n, γ) ¹²⁴ Sb	42,75	2,5 (а)
¹⁸⁷ ₈₄ W	23,9 ч	См. табл. 1 ниже		¹⁸⁶ W (n, γ) ¹⁸⁷ W	28,4	34 (а)
¹⁹⁸ ₇₉ Au	2,6946 сут	0,67588	1,01	¹⁹⁷ Au (n, γ) ¹⁹⁸ Au		98,8 (а)
		0,41180	95,53			

Примечание: (а) – сечение взаимодействия на тепловых нейтронах; (б) – сечение усреднено по спектру деления.

Приложение 4

Основные характеристики аналитических фильтров на основе волокнистых материалов ФПП и ФПА

Марка фильтра *	Марка фильтра материала	Назначение	Рабочая поверхность, см ²	Сопротивление материала при скорости воздуха 1 см/с, мм вод. ст.
АФ–РМП	ФПП–15–1,5	Определение Активн. РАЗ	30; 10; 20	4,0 ± 1,0
АФА–РМА	ФПА–15–2,0	То же	20	4,0 ± 1,0
АФА–ВП	ФПП–15–1,5	Определ весовой концентр. РАЗ	10,20	1,5 _{-0,1} ^{+0,3}
АФА–ДП	ФПП–15–1,5 (НЭЛ–3)	Определ дисперсности а/з	3,20	1,5 _{-0,1} ^{+0,3} (1,0 ± 0,1)
АФА–РГП	ЛФС–2	Автордиография и спектрометрия α – частиц	3	1,6 ± 0,2
Марка фильтра *	Толщина фильтр слоя, Мг/см ²		Максималь. проскок маслян. тумана с разм. частиц 0,15...0,17 мкм (%) при скорости в-ха, см/с	
			1	
АФ–РМП	3,0 ± 0,5		0,5	
АФА–РМА	3,0 ± 0,5		1,0	
АФА–ВП	3,0 ± 0,5		0,1	
АФА–ДП	3,0 ± 0,5 (1,5 ± 0,15)		0,1 (10)	
АФА–РГП	3,5 ± 0,5 (с подложкой) 0,2 ± 0,1		0,1	
Марка фильтра *	Термостойкость до температур, °С		Химическая стойкость к концентрир. кислотам и щелочам	
АФ–РМП	60		Да	
АФА–РМА	150		Нет	
АФА–ВП	60		Да	
АФА–ДП	60 (60)		Да «	
АФА–РГП	60		«	

* В полную маркировку аналитических фильтров входит марка фильтра и его рабочая поверхность, выраженная в квадратных сантиметрах.

Например, АФА–РМП–2,0 – это фильтр марки АФА–РМП с площадью рабочей поверхности 20 см².

Приложение 5

Предельные значения удельной и объемной активностей радионуклидов в отходах для отнесения их к радиоактивным отходам [1]

N п/п	Вид радионуклида	Период полураспада радионуклида <*>	Предельные значения удельной активности, Бк/г		Предельные значения объемной активности (газообразные отходы) <*>, Бк/м ³
			твердые отходы	жидкие отходы	
1.	H-3	12,3 года	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$
2.	Be-7	53,3 суток	$1 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$
3.	C-14	$5,73 \cdot 10^3$ лет	$1 \cdot 10^4$	24	55
4.	F-18	1,83 часа	10	–	$1,6 \cdot 10^3$
5.	Na-22	2,6 года	10	4,3	72
6.	Na-24	15 часов	10	–	$2,9 \cdot 10^2$
7.	Si-31	2,62 часа	$1 \cdot 10^3$	85	$1,11 \cdot 10^3$
8.	P-32	14,3 суток	$1 \cdot 10^3$	5,7	34
9.	P-33	25,4 суток	$1 \cdot 10^5$	57	72
10.	S-35	87,4 суток	$1 \cdot 10^5$	17,8	76
11.	Cl-36	$3,01 \cdot 10^5$ лет	$1 \cdot 10^4$	15	16
12.	Ar-37	35,04 суток	$1 \cdot 10^6$	–	$6,6 \cdot 10^8$
13.	Ar-41	1,83 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$5,1 \cdot 10^2$
14.	K-40	$1,28 \cdot 10^9$ лет	$1 \cdot 10^2$	2,2	31
15.	K-42	12,4 часа	$1 \cdot 10^2$	31	$5,2 \cdot 10^2$
16.	K-43	22,6 часа	10	–	$5,4 \cdot 10^2$
17.	Ca-45	163 суток	$1 \cdot 10^4$	19	30
18.	Ca-47	4,53 суток	10	8,6	53
19.	Sc-46	83,8 суток	10	9,1	16
20.	Sc-47	3,35 суток	$1 \cdot 10^2$	25	$1,5 \cdot 10^2$
21.	Sc-48	1,82 суток	10	8,1	89
22.	V-48	16,2 суток	10	6,9	45
23.	Cr-51	27,7 суток	$1 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^3$
24.	Mn-52	5,59 суток	10	7,6	77
25.	Mn-53	$3,7 \cdot 10^6$ лет	$1 \cdot 10^4$	$4,6 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$
26.	Mn-54	312 суток	10	–	72
27.	Mn-56	2,58 часа	10	–	$6,8 \cdot 10^2$
28.	Fe-52	8,28 часа	10	9,7	$1,2 \cdot 10^2$
29.	Fe-55	2,7 года	$1 \cdot 10^4$	42	$3,1 \cdot 10^2$
30.	Fe-59	44,5 суток	10	7,6	30
31.	Co-55	17,5 часа	10	–	$1,6 \cdot 10^2$
32.	Co-56	78,7 суток	10	5,5	24
33.	Co-57	271 сутки	$1 \cdot 10^2$	65	$2 \cdot 10^2$
34.	Co-58	70,8 суток	10	–	68
35.	Co-58m	9,15 часа	$1 \cdot 10^4$	$5,7 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^3$
36.	Co-60	5,27 года	10	4	11
37.	Co-61	1,65 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$1,9 \cdot 10^3$

38.	Ni-59	$7,5 \cdot 10^4$ лет	$1 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^2$	$8,5 \cdot 10^2$
39.	Ni-63	96 лет	$1 \cdot 10^5$	91	$2,6 \cdot 10^2$
40.	Ni-65	2,52 часа	10	–	$1 \cdot 10^3$
41.	Cu-64	12,7 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$9,2 \cdot 10^2$
42.	Zn-65	244 суток	10	3,5	72
43.	Zn-69m	13,8 часа	$1 \cdot 10^2$	41	$3,5 \cdot 10^2$
44.	Ga-72	14,1 часа	10	–	$1,5 \cdot 10^2$
45.	Ge-71	11,8 суток	$1 \cdot 10^4$	$1,14 \cdot 10^3$	$6,1 \cdot 10^3$
46.	As-73	80,3 суток	$1 \cdot 10^3$	53	$1,1 \cdot 10^2$
47.	As-74	17,8 суток	10	–	53
48.	As-76	1,1 суток	$1 \cdot 10^2$	8,6	$1,1 \cdot 10^2$
49.	As-77	1,62 суток	$1 \cdot 10^3$	34	$2,7 \cdot 10^2$
50.	Se-75	120 суток	$1 \cdot 10^2$	5,3	77
51.	Br-82	1,47 суток	10	–	$1,7 \cdot 10^2$
52.	Kr-76	14,8 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$1,7 \cdot 10^3$
53.	Kr-77	1,24 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$7 \cdot 10^2$
54.	Kr-79	1,46 суток	$1 \cdot 10^3$	–	$2,8 \cdot 10^3$
55.	Kr-81	$2,29 \cdot 10^5$ лет	$1 \cdot 10^4$	–	$1,3 \cdot 10^5$
56.	Kr-83m	1,83 часа	$1 \cdot 10^5$	–	$1,3 \cdot 10^7$
57.	Kr-85	10,76 года	$1 \cdot 10^5$	–	$1,2 \cdot 10^5$
58.	Kr-85m	4,48 часа	$1 \cdot 10^3$	–	$4,6 \cdot 10^3$
59.	Kr-87	1,27 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$8 \cdot 10^2$
60.	Kr-88	2,84 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$3,2 \cdot 10^2$
61.	Rb-86	18,7 суток	$1 \cdot 10^2$	4,9	68
62.	Sr-85	64,8 суток	$1 \cdot 10^2$	24	$1,6 \cdot 10^2$
63.	Sr-85m	1,16 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$2,1 \cdot 10^4$
64.	Sr-87m	2,8 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$4,3 \cdot 10^3$
65.	Sr-89	50,5 суток	$1 \cdot 10^3$	5,3	19
66.	Sr-90	29,1 года	$1 \cdot 10^2$ <***>	0,49	2,7
67.	Sr-91	9,5 часа	10	–	$2,3 \cdot 10^2$
68.	Sr-92	2,71 часа	10	–	$3,7 \cdot 10^2$
69.	Y-90	2,67 суток	$1 \cdot 10^3$	5,1	60
70.	Y-91	58,5 суток	$1 \cdot 10^3$	5,7	14
71.	Y-92	3,54 часа	$1 \cdot 10^2$	27	$4,3 \cdot 10^2$
72.	Y-93	10,1 часа	$1 \cdot 10^2$	11	$1,7 \cdot 10^2$
73.	Zr-93	$1,53 \cdot 10^6$ лет	$1 \cdot 10^3$ <***>	12	12
74.	Zr-95	64 суток	10	–	23
75.	Zr-97	16,9 часа	10 <***>	6,5	99
76.	Nb-93m	13,6 года	$1 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^2$
77.	Nb-94	$2,03 \cdot 10^4$ лет	10	8,1	11
78.	Nb-95	35,1 суток	10	–	72
79.	Nb-97	1,2 часа	10	–	$2,1 \cdot 10^3$

80.	Mo-90	5,67 часа	10	–	$2,6 \cdot 10^2$
81.	Mo-93	$3,5 \cdot 10^3$ лет	$1 \cdot 10^3$	4,4	$2,1 \cdot 10^2$
82.	Mo-99	2,75 суток	$1 \cdot 10^2$	22	$1,2 \cdot 10^2$
83.	Tc-96	4,28 суток	10	–	$1,3 \cdot 10^2$
84.	Tc-97	$2,6 \cdot 10^6$ лет	$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2$	$4,9 \cdot 10^2$
85.	Tc-97m	87 суток	$1 \cdot 10^3$	25	33
86.	Tc-99	$2,13 \cdot 10^5$ лет	$1 \cdot 10^4$	21	27
87.	Tc-99m	6,02 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$5,3 \cdot 10^3$
88.	Ru-97	2,9 суток	$1 \cdot 10^2$	91	$8,6 \cdot 10^2$
89.	Ru-103	39,3 суток	$1 \cdot 10^2$	19	46
90.	Ru-105	4,44 часа	10	–	$5,7 \cdot 10^2$
91.	Ru-106	1,01 года	$1 \cdot 10^2$ <***>	2	4,4
92.	Rh-105	1,47 суток	$1 \cdot 10^2$	37	$3 \cdot 10^2$
93.	Pd-103	17 суток	$1 \cdot 10^3$	72	$2,6 \cdot 10^2$
94.	Pd-109	13,4 часа	$1 \cdot 10^3$	24	$2,7 \cdot 10^2$
95.	Ag-105	41 сутки	$1 \cdot 10^2$	29	$1,5 \cdot 10^2$
96.	Ag-110m	250 суток	10	4,9	15
97.	Ag-111	7,45 суток	$1 \cdot 10^3$	11	72
98.	Cd-109	1,27 года	$1 \cdot 10^4$	6,9	14
99.	Cd-115	2,23 суток	$1 \cdot 10^2$	9,8	$1 \cdot 10^2$
100.	Cd-115m	44,6 суток	$1 \cdot 10^3$	4,2	15
101.	In-111	2,83 суток	$1 \cdot 10^2$	47	$4,4 \cdot 10^2$
102.	In-113m	1,66 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$4,7 \cdot 10^3$
103.	In-114m	49,5 суток	$1 \cdot 10^2$	3,3	6,8
104.	In-115m	4,49 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$1,5 \cdot 10^3$
105.	Sn-113	115 суток	$1 \cdot 10^3$	19	43
106.	Sn-125	9,64 суток	$1 \cdot 10^2$	4,4	35
107.	Sb-122	2,7 суток	$1 \cdot 10^2$	8,1	92
108.	Sb-124	60,2 суток	10	5,5	18
109.	Sb-125	2,77 года	$1 \cdot 10^2$	12	24
110.	Te-123m	120 суток	$1 \cdot 10^2$	8,6	27
111.	Te-125m	58 суток	$1 \cdot 10^3$	15	32
112.	Te-127	9,35 часа	$1 \cdot 10^3$	81	$7,2 \cdot 10^2$
113.	Te-127m	109 суток	$1 \cdot 10^3$	6	15
114.	Te-129	1,16 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$2,3 \cdot 10^3$
115.	Te-129m	33,6 суток	$1 \cdot 10^3$	4,6	17
116.	Te-131m	1,25 суток	10	7,2	91
117.	Te-132	3,26 суток	$1 \cdot 10^2$	3,6	40
118.	I-123	13,2 часа	$1 \cdot 10^2$	65	$6,6 \cdot 10^2$
119.	I-125	60,1 суток	$1 \cdot 10^3$	0,91	17
120.	I-126	13 суток	$1 \cdot 10^2$	0,47	6,3

121.	I-129	$1,57 \cdot 10^7$ лет	$1 \cdot 10^2$	0,13	2,9
122.	I-130	12,4 часа	10	6,9	71
123.	I-131	8,04 суток	$1 \cdot 10^2$	0,62	7,3
124.	I-132	2,3 часа	10	–	$5,4 \cdot 10^2$
125.	I-133	20,8 часа	10	3,1	29
126.	I-135	6,61 часа	10	–	$1,4 \cdot 10^2$
127.	Xe-131m	11,84 суток	$1 \cdot 10^4$	–	$8,5 \cdot 10^4$
128.	Xe-133	5,24 суток	$1 \cdot 10^3$	–	$2,2 \cdot 10^4$
129.	Xe-135	9,14 часа	$1 \cdot 10^3$	–	$2,8 \cdot 10^3$
130.	Cs-129	1,34 суток	$1 \cdot 10^2$	23	$1,9 \cdot 10^3$
131.	Cs-131	9,69 суток	$1 \cdot 10^3$	24	$3,1 \cdot 10^3$
132.	Cs-132	6,48 суток	10	–	$4,4 \cdot 10^2$
133.	Cs-134	2,06 года	10	0,72	19
134.	Cs-134m	2,9 часа	$1 \cdot 10^3$	$6,8 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^3$
135.	Cs-135	$2,3 \cdot 10^6$ лет	$1 \cdot 10^4$	6,9	$1,8 \cdot 10^2$
136.	Cs-136	13,1 суток	10	4,6	96
137.	Cs-137	30,17 года	10 <***>	1,1	27
138.	Ba-131	11,8 суток	$1 \cdot 10^2$	3	$1,4 \cdot 10^2$
139.	Ba-133	10,7 года	10	9,3	25
140.	Ba-140	12,7 суток	10 <***>	0,5	22
141.	La-140	1,68 суток	10	0,6	84
142.	Ce-139	138 суток	$1 \cdot 10^2$	5,3	65
143.	Ce-141	32,5 суток	$1 \cdot 10^2$	1,9	33
144.	Ce-143	1,38 суток	$1 \cdot 10^2$	1,2	$1,3 \cdot 10^2$
145.	Ce-144	284 суток	$1 \cdot 10^2$ <***>	2,6	3,3
146.	Pr-142	19,1 часа	$1 \cdot 10^2$	10	$1,4 \cdot 10^2$
147.	Pr-143	13,6 суток	$1 \cdot 10^4$	11	46
148.	Nd-147	11 суток	$1 \cdot 10^2$	12	46
149.	Nd-149	1,73 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$1 \cdot 10^3$
150.	Pm-147	2,62 года	$1 \cdot 10^4$	53	24
151.	Pm-149	2,21 суток	$1 \cdot 10^3$	14	$1,5 \cdot 10^2$
152.	Sm-151	90 лет	$1 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^2$	31
153.	Sm-153	1,95 суток	$1 \cdot 10^2$	19	$1,7 \cdot 10^2$
154.	Eu-152	13,3 года	10	9,8	2,9
155.	Eu-152m	9,32 часа	$1 \cdot 10^2$	27	$4 \cdot 10^2$
156.	Eu-154	8,8 года	10	6,9	2,3
157.	Eu-155	4,96 года	$1 \cdot 10^2$	43	18
158.	Gd-153	242 суток	$1 \cdot 10^2$	51	44
159.	Gd-159	18,6 часа	$1 \cdot 10^3$	27	$3,5 \cdot 10^2$
160.	Tb-160	72,3 суток	10	8,6	16
161.	Dy-165	2,33 часа	$1 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$
162.	Dy-166	3,4 суток	$1 \cdot 10^3$	8,5	60
163.	Ho-166	1,12 суток	$1 \cdot 10^3$	9,7	$1,3 \cdot 10^2$
164.	Er-169	9,3 суток	$1 \cdot 10^4$	37	$1,1 \cdot 10^2$
165.	Er-171	7,52 часа	$1 \cdot 10^2$	38	$4,3 \cdot 10^2$
166.	Tm-170	129 суток	$1 \cdot 10^3$	10	16

167.	Tm-171	1,92 года	$1 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^2$	86
168.	Yb-175	4,19 суток	$1 \cdot 10^3$	31	$1,5 \cdot 10^2$
169.	Lu-177	6,71 суток	$1 \cdot 10^3$	25	91
170.	Hf-181	42,4 суток	10	–	22
171.	Ta-182	115 суток	10	9,1	11
172.	W-181	121 сутки	$1 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^3$
173.	W-185	75,1 суток	$1 \cdot 10^4$	31	$5,3 \cdot 10^2$
174.	W-187	23,9 часа	$1 \cdot 10^2$	21	$3,5 \cdot 10^2$
175.	Re-186	3,78 суток	$1 \cdot 10^3$	9,1	92
176.	Re-188	17 часов	$1 \cdot 10^2$	9,7	$1,1 \cdot 10^2$
177.	Os-185	94 суток	10	27	72
178.	Os-191	15,4 суток	$1 \cdot 10^2$	24	60
179.	Os-191m	13 часов	$1 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^2$	$6,8 \cdot 10^2$
180.	Os-193	1,25 суток	$1 \cdot 10^2$	17	$1,9 \cdot 10^2$
181.	Ir-190	12,1 суток	10	11	46
182.	Ir-192	74 суток	10	9,8	17
183.	Ir-194	19,1 часа	$1 \cdot 10^2$	10	$1,4 \cdot 10^2$
184.	Pt-191	2,8 суток	$1 \cdot 10^2$	40	$6,7 \cdot 10^2$
185.	Pt-193m	4,33 суток	$1 \cdot 10^3$	30	$5,3 \cdot 10^2$
186.	Pt-197	18,3 часа	$1 \cdot 10^3$	34	$7,2 \cdot 10^2$
187.	Pt-197m	1,57 часа	$1 \cdot 10^2$	–	$2,9 \cdot 10^3$
188.	Au-198	2,69 суток	$1 \cdot 10^2$	14	$1,2 \cdot 10^2$
189.	Au-199	3,14 суток	$1 \cdot 10^2$	31	$1,4 \cdot 10^2$
190.	Hg-197	2,67 суток	$1 \cdot 10^2$	60	$3,6 \cdot 10^2$
191.	Hg-197m	23,8 часа	$1 \cdot 10^2$	29	$2 \cdot 10^2$
192.	Hg-203	46,6 суток	$1 \cdot 10^2$	7,2	46
193.	Tl-200	1,09 суток	10	–	$6 \cdot 10^2$
194.	Tl-201	3,04 суток	$1 \cdot 10^2$	–	$1,6 \cdot 10^3$
195.	Tl-202	12,2 суток	$1 \cdot 10^2$	30	$4,4 \cdot 10^2$
196.	Tl-204	3,78 года	$1 \cdot 10^4$	11	$1,6 \cdot 10^2$
197.	Pb-203	2,17 суток	$1 \cdot 10^2$	57	$5,3 \cdot 10^2$
198.	Pb-210	22,3 года	$10 <***>$	$2 \cdot 10^{-2}$	0,11
199.	Pb-212	10,6 часа	$10 <***>$	2,2	0,62
200.	Bi-206	6,24 суток	10	7,2	65
201.	Bi-207	38 лет	10	–	21
202.	Bi-210	5,01 суток	$1 \cdot 10^3$	11	1,2
203.	Bi-212	1,01 часа	$10 <***>$	–	3,6
204.	Po-205	1,8 часа	10	–	$1,6 \cdot 10^3$
205.	Po-207	5,83 часа	10	–	$1 \cdot 10^3$
206.	Po-210	138 суток	10	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$
207.	At-211	7,21 часа	$1 \cdot 10^3$	1,2	1,05
208.	Rn-222	3,82 суток	$10 <***>$	–	$2 \cdot 10^2$
209.	Ra-223	11,4 суток	$1 \cdot 10^2$ <***>	0,14	$1,5 \cdot 10^{-2}$
210.	Ra-224	3,66 суток	$10 <***>$	0,21	$3,7 \cdot 10^{-2}$
211.	Ra-225	14,8 суток	$1 \cdot 10^2$	0,14	$1,7 \cdot 10^{-2}$
212.	Ra-226	$1,6 \cdot 10^3$ лет	$10 <***>$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
213.	Ra-228	5,75 года	$10 <***>$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$

214.	Ac-228	6,13 часа	10	–	3,2
215.	Th-227	18,7 суток	10	1,6	$1,1 \cdot 10^{-2}$
216.	Th-228	1,91 года	1 <***>	0,19	$2,9 \cdot 10^{-3}$
217.	Th-229	$7,34 \cdot 10^3$ лет	1 <***>	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
218.	Th-230	$7,7 \cdot 10^4$ лет	1	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$
219.	Th-231	1,06 суток	$1 \cdot 10^3$	40	$3,1 \cdot 10^2$
220.	Th-232	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	1 <***>	$6 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$
221.	Th– природный, включая Th– 232	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет	1 <***>	–	–
222.	Th-234	24,1 суток	$1 \cdot 10^3$ <***>	4	15
223.	Pa-230	17,4 суток	10	–	0,14
224.	Pa-231	$3,27 \cdot 10^4$ лет	1	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$
225.	Pa-233	27 суток	$1 \cdot 10^2$	16	28
226.	U-230	20,8 суток	10 <***>	0,25	$8,1 \cdot 10^{-3}$
227.	U-231	4,2 суток	$1 \cdot 10^2$	49	$3 \cdot 10^2$
228.	U-232	72 года	1 <***>	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
229.	U-233	$1,58 \cdot 10^5$ лет	10	0,27	$3,2 \cdot 10^{-2}$
230.	U-234	$2,44 \cdot 10^5$ лет	10	0,28	$3,3 \cdot 10^{-2}$
231.	U-235	$7,04 \cdot 10^8$ лет	10 <***>	0,29	$3,7 \cdot 10^{-2}$
232.	U-236	$2,34 \cdot 10^7$ лет	10	0,29	$3,5 \cdot 10^{-2}$
233.	U-237	6,75 суток	$1 \cdot 10^2$	18	65
234.	U-238	$4,47 \cdot 10^9$ лет	10 <***>	0,3	$4 \cdot 10^{-2}$
235.	U–природный	$4,47 \cdot 10^9$ лет	1	–	–
236.	U-240	14,1 часа	$1 \cdot 10^3$	12	$1,6 \cdot 10^2$
237.	U-240	14,1 часа	10 <***>	–	–
238.	Np-237	$2,14 \cdot 10^6$ лет	1 <***>	0,13	$5,4 \cdot 10^{-3}$
239.	Np-239	2,36 суток	$1 \cdot 10^2$	17	$1,1 \cdot 10^2$
240.	Np-240	1,08 часа	10	–	$1,1 \cdot 10^3$
241.	Pu-234	8,8 часа	$1 \cdot 10^2$	85	5,2
242.	Pu-236	2,85 года	10	0,16	$6,2 \cdot 10^{-3}$
243.	Pu-237	45,3 суток	$1 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^2$	$3,2 \cdot 10^2$
244.	Pu-238	87,7 года	1	$6 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
245.	Pu-239	$2,41 \cdot 10^4$ лет	1	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
246.	Pu-240	$6,54 \cdot 10^3$ лет	1	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
247.	Pu-241	14,4 года	$1 \cdot 10^2$	2,9	0,14
248.	Pu-242	$3,76 \cdot 10^5$ лет	1	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
249.	Pu-243	4,95 часа	$1 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^3$
250.	Pu-244	$8,26 \cdot 10^7$ лет	1	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
251.	Am-241	432 года	1	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
252.	Am-242	16 часов	$1 \cdot 10^3$	46	6,5
253.	Am-242m	152 года	1 <***>	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
254.	Am-243	$7,38 \cdot 10^3$ лет	1 <***>	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
255.	Cm-242	163 суток	$1 \cdot 10^2$	1,4	$2,1 \cdot 10^{-2}$
256.	Cm-243	28,5 года	1	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$

257.	Cm-244	18,1 года	10	0,11	$4,6 \cdot 10^{-3}$
258.	Cm-245	$8,5 \cdot 10^3$ лет	1	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
259.	Cm-246	$4,73 \cdot 10^3$ лет	1	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
260.	Cm-247	$1,56 \cdot 10^7$ лет	1	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
261.	Cm-248	$3,39 \cdot 10^5$ лет	1	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
262.	Bk-249	320 суток	$1 \cdot 10^3$	24	0,77
263.	Cf-246	1,49 суток	$1 \cdot 10^3$	4,2	0,24
264.	Cf-248	334 суток	10	0,49	$1,4 \cdot 10^{-2}$
265.	Cf-249	350 лет	1	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
266.	Cf-250	13,1 года	10	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
267.	Cf-251	898 лет	1	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
268.	Cf-252	2,64 года	10	0,15	$5,6 \cdot 10^{-3}$
269.	Cf-253	17,8 суток	$1 \cdot 10^2$	9,8	$8,1 \cdot 10^{-2}$
270.	Cf-254	60,5 суток	1	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
271.	Es-253	20,5 суток	$1 \cdot 10^2$	2,2	$4 \cdot 10^{-2}$
272.	Es-254	276 суток	10	0,49	$1,4 \cdot 10^{-2}$
273.	Es-254m	1,64 суток	$1 \cdot 10^2$	3,3	0,23
274.	Fm-254	3,24 часа	$1 \cdot 10^4$	31	1,8
275.	Fm-255	20,1 часа	$1 \cdot 10^3$	5,4	0,4

<*> Справочные значения.

<*> Объемная активность при давлении 1 атм.

<***> Удельная активность отмеченных радионуклидов приведена в условиях их равновесия с дочерними радионуклидами, приведенными ниже:

Sr-90	Y-90
Zr-93	Nb-93m
Zr-97	Nb-97
Ru-106	Rh-106
Cs-137	Ba-137m
Ba-140	La-140
Ce-144	Pr-144
Pb-210	Bi-210, Po-210
Pb-212	Bi-212, Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)
Bi-212	Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)
Rn-222	Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214
Ra-223	Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207
Ra-224	Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)
Ra-226	Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210
Ra-228	Ac-228
Th-228	Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)
Th-229	Ra-225, Ac-225, Fr-221, At-217, Bi-213, Po-213, Pb-209
Th-232	Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)
Th-природный	Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)
Th-234	Pa-234m
U-230	Th-226, Ra-222, Rn-218, Po-214
U-232	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (0,36), Po-212 (0,64)
U-235	Th-231
U-238	Th-234, Pa-234m
U-природный	Th-234, Pa-234m, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210
U-240	Np-240m
Np-237	Pa-233
Am-242m	Am-242
Am-243	Np-239

Приложение 6

Значения дозовых коэффициентов, предела годового поступления с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности в воздухе отдельных радионуклидов для персонала

Радионуклид	Период полураспада	Тип соединения при ингаляции ^[1]	Дозовый коэффициент $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}$ Зв/Бк	Предел годового поступления ПП _{перс} , Бк в год	Допустимая среднегодовая объемная активность ДОА _{перс} , Бк/м ³
H-3	12,3 лет	Г1	1,8-11	1,1+09	4,4+05
		Г2	1,8-15	1,1+13	4,4+09
		Г3	1,8-13	1,1+11	4,4+07
Be-7	53,3 сут	П	4,8-11	4,2+08	1,7+05
		М	5,2-11	3,8+08	1,5+05
Be-10	1,60+06 лет	П	9,1-09	2,2+06	8,8+02
		М	3,2-08	6,3+05	2,5+02
C-11	0,340 час	Г1	3,2-12	6,2+09	2,5+06
		Г2	2,2-12	9,1+09	3,6+06
		Г3	1,2-12	1,7+10	6,7+06
C-14	5,73+03 лет	Г1	5,8-10	3,4+07	1,4+04
		Г2	6,2-12	3,2+09	1,3+06
		Г3	8,0-13	2,5+10	1,0+07
F-18	1,83 час	Б	3,0-11	6,7+08	2,7+05
		П	5,7-11	3,5+08	1,4+05
		М	6,0-11	3,3+08	1,3+05
Na-22	2,60 лет	Б	1,3-09	1,5+07	6,2+03
Na-24	15,0 час	Б	2,9-10	6,9+07	2,8+04
Mg-28	20,9 час	Б	6,4-10	3,1+07	1,3+04
		П	1,2-09	1,7+07	6,7+03
Al-26	7,16+05 лет	Б	1,1-08	1,8+06	7,3+02
		П	1,8-08	1,1+06	4,4+02
Si-31	2,62 час	Б	2,9-11	6,9+08	2,8+05
		П	7,5-11	2,7+08	1,1+05
		М	8,0-11	2,5+08	1,0+05
Si-32	4,50+02 лет	Б	3,2-09	6,3+06	2,5+03
		П	1,5-08	1,3+06	5,3+02
		М	1,1-07	1,8+05	7,3+01
P-32	14,3 сут	Б	8,0-10	2,5+07	1,0+04
		П	3,2-09	6,3+06	2,5+03
Классификация соединений приведена в Приложении 8					
P-33	25,4 сут	Б	9,6-11	2,1+08	8,3+04
		П	1,4-09	1,4+07	5,7+03
S-35	87,4 сут	Б	5,3-11	3,8+08	1,5+05
		П	1,3-09	1,5+07	6,2+03
		Г1	7,0-10	2,9+07	1,1+04
		Г2	1,1-10	1,8+08	7,3+04
Cl-36	3,01+05 лет	Б	3,4-10	5,9+07	2,4+04
		П	6,9-09	2,9+06	1,2+03
Cl-38	0,620 час	Б	2,7-11	7,4+08	3,0+05
		П	4,7-11	4,3+08	1,7+05
Cl-39	0,927 час	Б	2,7-11	7,4+08	3,0+05
		П	4,8-11	4,2+08	1,7+05
K-40 ^[2]	1,28+09 лет	Б	2,1-09	9,5+06	3,8+03
K-42	12,4 час	Б	1,3-10	1,5+08	6,2+04

K-43	22,6 час	Б	1,5–10	1,3+08	5,3+04
K-44	0,369 час	Б	2,1–11	9,5+08	3,8+05
K-45	0,333 час	Б	1,6–11	1,3+09	5,0+05
Ca-41	1,40+05 лет	П	1,7–10	1,2+08	4,7+04
Ca-45	163 сут	П	2,7–09	7,4+06	3,0+03
Ca-47	4,53 сут	П	1,8–09	1,1+07	4,4+03
Sc-43	3,89 час	М	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Sc-44	3,93 час	М	1,9–10	1,1+08	4,2+04
Sc-44m	2,44 сут	М	1,5–09	1,3+07	5,3+03
Sc-46	83,8 сут	М	6,4–09	3,1+06	1,3+03
Sc-47	3,35 сут	М	7,0–10	2,9+07	1,1+04
Sc-48	1,82 сут	М	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Sc-49	0,956 час	М	4,1–11	4,9+08	2,0+05
Ti-44	47,3 лет	Б	6,1–08	3,3+05	1,3+02
		М	4,0–08	5,0+05	2,0+02
		П	1,2–07	1,7+05	6,7+01
Ti-45	3,08 час	Б	4,6–11	4,3+08	1,7+05
		П	9,1–11	2,2+08	8,8+04
		М	9,6–11	2,1+08	8,3+04
V-47	0,543 час	Б	1,9–11	1,1+09	4,2+05
		П	3,1–11	6,5+08	2,6+05
V-48	16,2 сут	Б	1,1–09	1,8+07	7,3+03
^[2] При поступлении изотопа ⁴⁰ K дополнительно к природной смеси изотопов калия					
		П	2,3–09	8,7+06	3,5+03
V-49	330 сут	Б	2,1–11	9,5+08	3,8+05
		П	3,2–11	6,3+08	2,5+05
Cr-48	23,0 час	Б	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
		М	2,2–10	9,1+07	3,6+04
Cr-49	0,702 час	Б	2,0–11	1,0+09	4,0+05
		П	3,5–11	5,7+08	2,3+05
		М	3,7–11	5,4+08	2,2+05
Cr-51	27,7 сут	Б	2,1–11	9,5+08	3,8+05
		П	3,1–11	6,5+08	2,6+05
		М	3,6–11	5,6+08	2,2+05
Mn-51	0,770 час	Б	2,4–11	8,3+08	3,3+05
		П	4,3–11	4,7+08	1,9+05
Mn-52	5,59 сут	Б	9,9–10	2,0+07	8,1+03
		П	1,4–09	1,4+07	5,7+03
Mn-52m	0,352 час	Б	2,0–11	1,0+09	4,0+05
		П	3,0–11	6,7+08	2,7+05
Mn-53	3,70+06 лет	Б	2,9–11	6,9+08	2,8+05
		П	5,2–11	3,8+08	1,5+05
Mn-54	312 сут	Б	8,7–10	2,3+07	9,2+03
		П	1,5–09	1,3+07	5,3+03
Mn-56	2,58 час	Б	6,9–11	2,9+08	1,2+05
		П	1,3–10	1,5+08	6,2+04
Fe-52	8,28 час	Б	4,1–10	4,9+07	2,0+04
		П	6,3–10	3,2+07	1,3+04
Fe-55	2,70 лет	Б	7,7–10	2,6+07	1,0+04
		П	3,7–10	5,4+07	2,2+04
Fe-59	44,5 сут	Б	2,2–09	9,1+06	3,6+03
		П	3,5–09	5,7+06	2,3+03
Fe-60	1,00+05 лет	Б	2,8–07	7,1+04	2,9+01
		П	1,3–07	1,5+05	6,2+01
Co-55	17,5 час	П	5,1–10	3,9+07	1,6+04
		М	5,5–10	3,6+07	1,5+04
Co-56	78,7 сут	П	4,6–09	4,3+06	1,7+03

		М	6,3–09	3,2+06	1,3+03
Co–57	271 сут	П	5,2–10	3,8+07	1,5+04
		М	9,4–10	2,1+07	8,5+03
Co–58	70,8 сут	П	1,5–09	1,3+07	5,3+03
		М	2,0–09	1,0+07	4,0+03
Co–58m	9,15 час	П	1,3–11	1,5+09	6,2+05
		М	1,6–11	1,3+09	5,0+05
Co–60	5,27 лет	П	9,6–09	2,1+06	8,3+02
		М	2,9–08	6,9+05	2,8+02
Co–60m	0,174 час	П	1,1–12	1,8+10	7,3+06
		М	1,3–12	1,5+10	6,2+06
Co–61	1,65 час	П	4,8–11	4,2+08	1,7+05
		М	5,1–11	3,9+08	1,6+05
Co–62m	0,232 час	П	2,1–11	9,5+08	3,8+05
		М	2,2–11	9,1+08	3,6+05
Ni –56	6,10 сут	Б	5,1–10	3,9+07	1,6+04
		П	8,6–10	2,3+07	9,3+03
		Г	1,2–09	1,7+07	6,7+03
Ni –57	1,50 сут	Б	2,8–10	7,1+07	2,9+04
		П	5,1–10	3,9+07	1,6+04
		Г	5,6–10	3,6+07	1,4+04
Ni –59	7,50+04 лет	Б	1,8–10	1,1+08	4,4+04
		П	1,3–10	1,5+08	6,2+04
		Г	8,3–10	2,4+07	9,6+03
Ni –63	96,0 лет	Б	4,4–10	4,5+07	1,8+04
		П	4,4–10	4,5+07	1,8+04
		Г	2,0–09	1,0+07	4,0+03
Ni –65	2,52 час	Б	4,4–11	4,5+08	1,8+05
		П	8,7–11	2,3+08	9,2+04
		Г	3,6–10	5,6+07	2,2+04
Ni –66	2,27 сут	Б	4,5–10	4,4+07	1,8+04
		П	1,6–09	1,3+07	5,0+03
		Г	1,6–09	1,3+07	5,0+03
Cu –60	0,387 час	Б	2,4–11	8,3+08	3,3+05
		П	3,5–11	5,7+08	2,3+05
		М	3,6–11	5,6+08	2,2+05
Cu –61	3,41 час	Б	4,0–11	5,0+08	2,0+05
		П	7,6–11	2,6+08	1,1+05
		М	8,0–11	2,5+08	1,0+05
Cu –64	12,7 час	Б	3,8–11	5,3+08	2,1+05
		П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Cu –67	2,58 сут	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		П	5,2–10	3,8+07	1,5+04
		М	5,8–10	3,4+07	1,4+04
Zn –62	9,26 час	М	4,7–10	4,3+07	1,7+04
Zn –63	0,635 час	М	3,8–11	5,3+08	2,1+05
Zn –65	244 сут	М	2,9–09	6,9+06	2,8+03
Zn –69	0,950 час	М	2,8–11	7,1+08	2,9+05
Zn –69 m	13,8 час	М	2,6–10	7,7+07	3,1+04
Zn –71 m	3,92 час	М	1,6–10	1,3+08	5,0+04
Zn –72	1,94 сут	М	1,2–09	1,7+07	6,7+03
Ga –65	0,253 час	Б	1,2–11	1,7+09	6,7+05
		П	1,8–11	1,1+09	4,4+05
Ga –66	9,40 час	Б	2,7–10	7,4+07	3,0+04
		П	4,6–10	4,3+07	1,7+04
Ga –67	3,26 сут	Б	6,8–11	2,9+08	1,2+05
		П	2,3–10	8,7+07	3,5+04

Ga –68	1,13 час	Б	2,8–11	7,1+08	2,9+05
		П	5,1–11	3,9+08	1,6+05
Ga –70	0,353 час	Б	9,3–12	2,2+09	8,6+05
		П	1,6–11	1,3+09	5,0+05
Ga –72	14,1 час	Б	3,1–10	6,5+07	2,6+04
		П	5,5–10	3,6+07	1,5+04
Ga –73	4,91 час	Б	5,8–11	3,4+08	1,4+05
		П	1,5–10	1,3+08	5,3+04
Ge –66	2,27 час	Б	5,7–11	3,5+08	1,4+05
		П	9,2–11	2,2+08	8,7+04
Ge –67	0,312 час	Б	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		П	2,6–11	7,7+08	3,1+05
Ge –68	288 сут	Б	5,4–10	3,7+07	1,5+04
		П	1,3–08	1,5+06	6,2+02
Ge –69	1,63 сут	Б	1,4–10	1,4+08	5,7+04
		П	2,9–10	6,9+07	2,8+04
Ge –71	11,8 сут	Б	5,0–12	4,0+09	1,6+06
		П	1,0–11	2,0+09	8,0+05
Ge –75	1,38 час	Б	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		П	3,7–11	5,4+08	2,2+05
		Б	1,5–10	1,3+08	5,3+04
		П	3,6–10	5,6+07	2,2+04
Ge –78	1,45 час	Б	4,8–11	4,2+08	1,7+05
		П	9,7–11	2,1+08	8,2+04
As –69	0,253 час	П	2,2–11	9,1+08	3,6+05
As –70	0,876 час	П	7,2–11	2,8+08	1,1+05
As –71	2,70 сут	П	4,0–10	5,0+07	2,0+04
As –72	1,08 сут	П	9,2–10	2,2+07	8,7+03
As –73	80,3 сут	П	9,3–10	2,2+07	8,6+03
As –74	17,8 сут	П	2,1–09	9,5+06	3,8+03
As –76	1,10 сут	П	7,4–10	2,7+07	1,1+04
As –77	1,62 сут	П	3,8–10	5,3+07	2,1+04
As –78	1,51 час	П	9,2–11	2,2+08	8,7+04
Se –70	0,683 час	Б	4,5–11	4,4+08	1,8+05
		П	7,3–11	2,7+08	1,1+05
Se –73	7,15 час	Б	8,6–11	2,3+08	9,3+04
		П	1,6–10	1,3+08	5,0+04
Se –73 m	0,650 час	Б	9,9–12	2,0+09	8,1+05
		П	1,8–11	1,1+09	4,4+05
Se –75	120 сут	Б	1,0–09	2,0+07	8,0+03
		П	1,4–09	1,4+07	5,7+03
Se –79	6,50+04 лет	Б	1,2–09	1,7+07	6,7+03
		П	2,9–09	6,9+06	2,8+03
Se –81	0,308 час	Б	8,6–12	2,3+09	9,3+05
		П	1,5–11	1,3+09	5,3+05
Se –81 m	0,954 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		П	4,7–11	4,3+08	1,7+05
Se –83	0,375 час	Б	1,9–11	1,1+09	4,2+05
		П	3,3–11	6,1+08	2,4+05
Br –74	0,422 час	Б	2,8–11	7,1+08	2,9+05
		П	4,1–11	4,9+08	2,0+05
Br–74m	0,691 час	Б	4,2–11	4,8+08	1,9+05
		П	6,5–11	3,1+08	1,2+05
Br –75	1,63 час	Б	3,1–11	6,5+08	2,6+05
		П	5,5–11	3,6+08	1,5+05
Br –76	16,2 час	Б	2,6–10	7,7+07	3,1+04
		П	4,2–10	4,8+07	1,9+04
Br –77	2,33 сут	Б	6,7–11	3,0+08	1,2+05

		П	8,7–11	2,3+08	9,02+04
Br –80	0,290 час	Б	6,3–12	3,2+09	1,3+06
		П	1,0–11	2,0+09	8,0+05
Br–80m	4,42 час	Б	3,5–11	5,7+08	2,3+05
		П	7,6–11	2,6+08	1,1+05
Br–82	1,47сут	Б	3,7–10	5,4+07	2,2+04
		П	6,4–10	3,1+07	1,3+04
Br–83	2,39 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		П	4,8–11	4,2+08	1,7+05
Br–84	0,530 час	Б	2,3–11	8,7+08	3,5+05
		П	3,9–11	5,1+08	2,1+05
Rb–79	0,382 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
Rb–81	4,58 час	Б	3,7–11	5,4+08	2,2+05
Rb–81 m	0,533 час	Б	7,3–12	2,7+09	1,1+06
Rb –82m	6,20 час	Б	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Rb–83	86,2 сут	Б	7,1–10	2,8+07	1,1+04
Rb–84	32,8 сут	Б	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Rb–86	18,6сут	Б	9,6–10	2,1+07	8,3+03
Rb–88	0,297 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
Rb–89	0,253 час	Б	1,4–11	1,4+09	5,7+05
Sr –80	1,67 час	Б	7,6–11	2,6+08	1,1+05
		М	1,4–10	1,4+08	5,7+04
Sr –81	0,425 час	Б	2,2–11	9,1+08	3,6+05
		М	3,8–11	5,3+08	2,1+05
Sr –82	25,0 сут	Б	2,2–09	9,1+06	3,6+03
		М	1,0–08	2,0+06	8,0+02
Sr –83	1,35 сут	Б	1,7–10	1,2+08	4,7+04
		М	3,4–10	5,9+07	2,4+04
Sr –85	64,8 сут	Б	3,9–10	5,1+07	2,1+04
		М	7,7–10	2,6+07	1,0+04
Sr–85m	1,16 час	Б	3,1–12	6,5+09	2,6+06
		М	4,5–12	4,4+09	1,8+06
Sr –87 m	2,80 час	Б	1,2–11	1,7+09	6,7+05
		М	2,2–11	9,1+08	3,6+05
Sr –89	50,5 сут	Б	1,0–09	2,0+07	8,0+03
		М	7,5–09	2,7+06	1,1+03
Sr –90	29,1 лет	Б	2,4–08	8,3+05	3,3+02
		М	1,5–07	1,3+05	5,3+01
Sr –91	9,50 час	Б	1,7–10	1,2+08	4,7+04
		М	4,1–10	4,9+07	2,0+04
Sr –92	271 час	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	2,3–10	8,7+07	3,5+04
Y –86	14,7 час	П	4,8–10	4,2+07	1,7+04
		М	4,9–10	4,1+07	1,6+04
Y –86 m	0,800 час	П	2,9–11	6,9+08	2,8+05
		М	3,0–11	6,7+08	2,7+05
Y –87	3,35 сут	П	3,8–10	5,3+07	2,1+04
		М	4,0–10	5,0+07	2,0+04
Y –88	107 сут	П	3,9–09	5,1+06	2,1+03
		М	4,1–09	4,9+06	2,0+03
Y –90	2,67 сут	П	1,4–09	1,4+07	5,7+03
		М	1,5–09	1,3+07	5,3+03
Y –90m	3,19 час	П	9,6–11	2,1+08	8,3+04
		М	1,0–10	2,0+08	8,0+04
Y –91	58,5 сут	П	6,7–09	3,0+06	1,2+03
		М	8,4–09	2,4+06	9,5+02
Y –91m	0,828 час	П	1,0–11	2,0+09	8,0+05
		М	1,1–11	1,8+09	7,3+05

Y –92	3,54 час	П	1,9–10	1,1+08	4,2+04
		М	2,0–10	1,0+08	4,0+04
Y –93	10,1 час	П	4,1–10	4,9+07	2,0+04
		М	4,3–10	4,7+07	1,9+04
Y –94	0,318 час	П	2,8–11	7,1+08	2,9+05
		М	2,9–11	6,9+08	2,8+05
Y –95	0,178 час	П	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		М	1,7–11	1,2+09	4,7+05
Zr–86	16,5 час	Б	3,0–10	6,7+07	2,7+04
		П	4,3–10	4,7+07	1,9+04
		М	4,5–10	4,4+07	1,8+04
Zr–88	83,4 сут	Б	3,5–09	5,7+06	2,3+03
		П	2,5–09	8,0+06	3,2+03
		М	3,3–09	6,1+06	2,4+03
Zr–89	3,27 сут	Б	3,1–10	6,5+07	2,6+04
		П	5,3–10	3,8+07	1,5+04
		М	5,5–10	3,6+07	1,5+04
Zr–93	1,53+06 лет	Б	2,5–08	8,0+05	3,2+02
		П	9,6–09	2,1+06	8,3+02
		М	3,1–09	6,5+06	2,6+03
Zr–95	64,0 сут	Б	2,5–09	8,0+06	3,2+03
		П	4,5–09	4,4+06	1,8+03
		М	5,5–09	3,6+06	1,5+03
Zr–97	16,9 час	Б	4,2–10	4,8+07	1,9+04
		П	9,4–10	2,1+07	8,5+03
		М	1,0–09	2,0+07	8,0+03
Nb –88	0,238 час	П	2,9–11	6,9+08	2,8+05
		М	3,0–11	6,7+08	2,7+05
Nb –89	2,03 час	П	1,2–10	1,7+08	6,7+04
		М	1,3–10	1,5+08	6,2+04
Nb –89	1,10 час	П	7,1–11	2,8+08	1,1+05
		М	7,4–11	2,7+08	1,1+05
Nb –90	14,6 час	П	6,6–10	3,0+07	1,2+04
		М	6,9–10	2,9+07	1,2+04
Nb –93 m	13,6 лет	П	4,6–10	4,3+07	1,7+04
		М	1,6–09	1,3+07	5,0+03
Nb –94	2,03+04 лет	П	1,0–08	2,0+06	8,0+02
		М	4,5–08	4,4+05	1,8+02
Nb –95	35,1 сут	П	1,4–09	1,4+07	5,7+03
		М	1,6–09	1,3+07	5,0+03
Nb –95 m	3,61 сут	П	7,6–10	2,6+07	1,1+04
		М	8,5–10	2,4+07	9,4+03
Nb –96	23,3 час	П	6,5–10	3,1+07	1,2+04
		М	6,8–10	2,9+07	1,2+04
Nb –97	1,2 час	П	4,4–11	4,5+08	1,8+05
		М	4,7–11	4,3+08	1,7+05
Nb –98	0,858 час	П	5,9–11	3,4+08	1,4+05
		М	6,1–11	3,3+08	1,3+05
Mo –90	5,67 час	Б	1,7–10	1,2+08	4,7+04
		М	3,7–10	5,4+07	2,2+04
Mo –93	3,50+03 лет	Б	1,0–09	2,0+07	8,0+03
		М	2,2–09	9,1+06	3,6+03
Mo–93m	6,85 час	Б	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		М	1,8–10	1,1+08	4,4+04
Mo –99	2,75 сут	Б	2,3–10	8,7+07	3,5+04
		М	9,7–10	2,1+07	8,2+03
Mo –101	0,244 час	Б	1,5–11	1,3+09	5,3+05
		М	2,7–11	7,4+08	3,0+05

Tc-93	2,75 час	Б	3,4-11	5,9+08	2,4+05
		П	3,6-11	5,6+08	2,2+05
Tc-93 m	0,725 час	Б	1,5-11	1,3+09	5,3+05
		П	1,7-11	1,2+09	4,7+05
Tc-94	4,88 час	Б	1,2-10	1,7+08	6,7+04
		П	1,3-10	1,5+08	6,2+04
Tc-94 m	0,867 час	Б	4,3-11	4,7+08	1,9+05
		П	4,9-11	4,1+08	1,6+05
Tc-95	20,0 час	Б	1,0-10	2,0+08	8,0+04
		П	1,0-10	2,0+08	8,0+04
Tc-95 m	61,0 сут	Б	3,1-10	6,5+07	2,6+04
		П	8,7-10	2,3+07	9,2+03
Tc-96	4,28 сут	Б	6,0-10	3,3+07	1,3+04
		П	7,1-10	2,8+07	1,1+04
Tc-96 m	0,858 час	Б	6,5-12	3,1+09	1,2+06
		П	7,7-12	2,6+09	1,0+06
Tc-97	2,60+06 лет	Б	4,5-11	4,4+08	1,8+05
		П	2,1-10	9,5+07	3,8+04
Tc-97 m	87,0 сут	Б	2,8-10	7,1+07	2,9+04
		П	3,1-09	6,5+06	2,6+03
Tc-98	4,20+06 лет	Б	1,0-09	2,0+07	8,0+03
		П	8,1-09	2,5+06	9,9+02
Tc-99	2,13+05 лет	Б	2,9-10	6,9+07	2,8+04
		П	3,9-09	5,1+06	2,1+03
Tc-99m	6,02 час	Б	1,2-11	1,7+09	6,7+05
		П	1,9-11	1,1+09	4,2+05
Tc-101	0,237 час	Б	8,7-12	2,3+09	9,2+05
		П	1,3-11	1,5+09	6,2+05
Tc-104	0,303 час	Б	2,4-11	8,3+08	3,3+05
		П	3,0-11	6,7+08	2,7+05
Ru-94	0,863 час	Б	2,7-11	7,4+08	3,0+05
		П	4,4-11	4,5+08	1,8+05
		М	4,6-11	4,3+08	1,7+05
		Г	5,6-11	3,6+08	1,4+05
Ru-97	2,90 сут	Б	6,7-11	3,0+08	1,2+05
		П	1,1-10	1,8+08	7,3+04
		М	1,1-10	1,8+08	7,3+04
		Г	1,2-10	1,7+08	6,7+04
Ru-103	39,3 сут	Б	4,9-10	4,1+07	1,6+04
		П	2,3-09	8,7+06	3,5+03
		М	2,8-09	7,1+06	2,9+03
		Г	1,1-09	1,8+07	7,3+03
Ru-105	4,44 час	Б	7,1-11	2,8+08	1,1+05
		П	1,7-10	1,2+08	4,7+04
		М	1,8-10	1,1+08	4,4+04
		Г	1,8-10	1,1+08	4,4+04
Ru-106	1,01 лет	Б	8,0-09	2,5+06	1,0+03
		П	2,6-08	7,7+05	3,1+02
		М	6,2-08	3,2+05	1,3+02
		Г	1,8-08	1,1+06	4,4+02
Rh-99	16,0 сут	Б	3,3-10	6,1+07	2,4+04
		П	7,3-10	2,7+07	1,1+04
		М	8,3-10	2,4+07	9,6+03
Rh-99m	4,70 час	Б	3,0-11	6,7+08	2,7+05
		П	4,1-11	4,9+08	2,0+05
		М	4,3-11	4,7+08	1,9+05
Rh-100	20,8 час	Б	2,8-10	7,1+07	2,9+04
		П	3,6-10	5,6+07	2,2+04

		М	3,7–10	5,4+07	2,2+04
Rh –101	3,20 лет	Б	1,4–09	1,4+07	5,7+03
		П	2,2–09	9,1+06	3,6+03
		М	5,0–09	4,0+06	1,6+03
Rh –101 m	4,34 сут	Б	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
		М	2,1–10	9,5+07	3,8+04
Rh –102	2,90 лет	Б	7,3–09	2,7+0	1,1+03
		П	6,5–09	3,1+06	1,2+03
		М	1,6–08	1,3+06	5,0+02
Rh –102 m	207 сут	Б	1,5–09	1,3+07	5,3+03
		П	3,8–09	5,3+06	2,1+03
		М	6,7–09	3,0+06	1,2+03
Rh –103 m	0,935 час	Б	8,6–13	2,3+10	9,3+06
		П	2,3–12	8,7+09	3,5+06
		М	2,5–12	8,0+09	3,2+06
Rh –105	1,47 сут	Б	8,7–11	2,3+08	9,2+04
		П	3,1–10	6,5+07	2,6+04
		М	3,4–10	5,9+07	2,4+04
Rh –106 m	2,20 час	Б	7,0–11	2,9+08	1,1+05
		П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Rh –107	0,362 час	Б	9,6–12	2,1+09	8,3+05
		П	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		М	1,7–11	1,2+09	4,7+05
Pd –100	3,63 сут	Б	4,9–10	4,1+07	1,6+04
		П	7,9–10	2,5+07	1,0+04
		М	8,3–10	2,4+07	9,6+03
Pd –101	8,27 час	Б	4,2–11	4,8+08	1,9+05
		П	6,2–11	3,2+08	1,3+05
		М	6,4–11	3,1+08	1,3+05
Pd –103	17,0 сут	Б	9,0–11	2,2+08	8,9+04
		П	3,5–10	5,7+07	2,3+04
		М	4,0–10	5,0+07	2,0+04
Pd –107	6,50+06 лет	Б	2,6–11	7,7+08	3,1+05
		П	8,0–11	2,5+08	1,0+05
		М	5,5–10	3,6+07	1,5+04
Pd –109	13,4 час	Б	1,2–10	1,7+08	6,7+04
		П	3,4–10	5,9+07	2,4+04
		М	3,6–10	5,6+07	2,2+04
Ag –102	0,215 час	Б	1,4–11	1,4+09	5,7+05
		П	1,8–11	1,1+09	4,4+05
		М	1,9–11	1,1+09	4,2+05
Ag –103	1,09 час	Б	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		П	2,7–11	7,4+08	3,0+05
		М	2,8–11	7,1+08	2,9+05
Ag –104	1,15 час	Б	3,0–11	6,7+08	2,7+05
		П	3,9–11	5,1+08	2,1+05
		М	4,0–11	5,0+08	2,0+05
Ag –104m	0,558 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		П	2,6–1,1	7,7+08	3,1+05
		М	2,7–11	7,4+08	3,0+05
Ag –105	41,0 сут	Б	5,4–10	3,7+07	1,5+04
		П	6,9–10	2,9+07	1,2+04
		М	7,8–10	2,6+07	1,0+04
Ag –106	0,399 час	Б	9,8–12	2,0+09	8,2+05
		П	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		М	1,6–11	1,3+09	5,0+05

Ag –106 m	8,41 сут	Б	1,1–09	1,8+07	7,3+03
		П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
		М	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Ag–108m	1,27+02 лет	Б	6,1–09	3,3+06	1,3+03
		П	7,0–09	2,9+06	1,1+03
		М	3,5–08	5,7+05	2,3+02
Ag–110m	250 сут	Б	5,5–09	3,6+06	1,5+03
		П	7,2–09	2,8+06	1,1+03
		М	1,2–08	1,7+06	6,7+02
Ag –111	7,45 сут	Б	4,1–10	4,9+07	2,0+04
		П	1,5–09	1,3+07	5,3+03
		М	1,7–09	1,2+07	4,7+03
Ag–112	3,12 час	Б	8,2–11	2,4+08	9,8+04
		П	1,7–10	1,2+08	4,7+04
		М	1,8–10	1,1+08	4,4+04
Ag–115	0,333 час	Б	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		П	2,8–11	7,1+08	2,9+05
		М	3,0–11	6,7+08	2,7+05
Cd –104	0,961 час	Б	2,7–11	7,4+08	3,0+05
		П	3,6–11	5,6+08	2,2+05
		М	3,7–11	5,4+08	2,2+05
Cd –107	6,49 час	Б	2,3–11	8,7+08	3,5+05
		П	8,1–11	2,5+08	9,9+04
		М	8,7–11	2,3+08	9,2+04
Cd –109	1,27 лет	Б	8,1–09	2,5+06	9,9+02
		П	6,2–09	3,2+06	1,3+03
		М	5,8–09	3,4+06	1,4+03
Cd –113	9,30+15 лет	Б	1,2–07	1,7+05	6,7+01
		П	5,3–08	3,8+05	1,5+02
		М	2,5–08	8,0+05	3,2+02
Cd –113 m	13,6 лет	Б	1,1–07	1,8+05	7,3+01
		П	5,0–08	4,0+05	1,6+02
		М	3,0–08	6,7+05	2,7+02
Cd –115	2,23 сут	Б	3,7–10	5,4+07	2,2+04
		П	9,7–10	2,1+07	8,2+03
		М	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Cd –115 m	44,6 сут	Б	5,3–09	3,8+06	1,5+03
		П	5,9–09	3,4+06	1,4+03
		М	7,3–09	2,7+06	1,1+03
Cd –117	2,49 час	Б	7,3–11	2,7+08	1,1+05
		П	1,6–10	1,3+08	5,0+04
		М	1,7–10	1,2+08	4,7+04
Cd –117 m	3,36 час	Б	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
		М	2,1–10	9,5+07	3,8+04
In –109	4,20 час	Б	3,2–11	6,3+08	2,5+05
		П	4,4–11	4,5+08	1,8+05
In –110	4,90 час	Б	1,2–10	1,7+08	6,7+04
		П	1,4–10	1,4+08	5,7+04
In–110	1,15 час	Б	3,1–11	6,5+08	2,6+05
		П	5,0–11	4,0+08	1,6+05
In–111	2,83 сут	Б	1,3–10	1,5+08	6,2+04
		П	2,3–10	8,7+07	3,5+04
In –112	0,240 час	Б	5,0–12	4,0+09	1,6+06
		П	7,8–12	2,6+09	1,0+06
In–113m	1,66 час	Б	1,0–11	2,0+09	8,0+05
		П	2,0–11	1,0+09	4,0+05
In–114m	49,5 сут	Б	9,3–09	2,2+06	8,6+02

		П	5,9–09	3,4+06	1,4+03
ln–115m	4,49 час	Б	2,5–11	8,0+08	3,2+05
		П	6,0–11	3,3+08	1,3+05
ln –116 m	0,902 час	Б	3,0–11	6,7+08	2,7+05
		П	4,8–11	4,2+08	1,7+05
ln –117	0,730 час	Б	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		П	3,0–11	6,7+08	2,7+05
ln–117m	1,94 час	Б	3,1–11	6,5+08	2,6+05
		П	7,3–11	2,7+08	1,1+05
ln –119 m	0,300 час	Б	1,1–11	1,8+09	7,3+05
		П	1,8–11	1,1+09	4,4+05
Sn –110	4,00 час	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		П	1,6–10	1,3+08	5,0+04
Sn –111	0,588 час	Б	8,3–12	2,4+09	9,6+05
		П	1,4–11	1,4+09	5,7+05
Sn ;113	115 сут	Б	5,4–10	3,7+07	1,5+04
		П	2,5–09	8,0+06	3,2+03
Sn–117m	13,6 сут	Б	2,9–10	6,9+07	2,8+04
		П	2,3–09	8,7+06	3,5+03
Sn –119 m	293 сут	Б	2,9–10	6,9+07	2,8+04
		П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
Sn –121	1,13 сут	Б	6,4–11	3,1+08	1,3+05
		П	2,2–10	9,1+07	3,6+04
Sn –121 m	55,0 лет	Б	8,0–10	2,5+07	1,0+04
		П	4,2–09	4,8+06	1,9+03
Sn –123	129 сут	Б	1,2–09	1,7+07	6,7+03
		П	7,7–09	2,6+06	1,0+03
Sn –123 m	0,668 час	Б	1,4–11	1,4+09	5,7+05
		П	2,8–11	7,1+08	2,9+05
Sn –125	9,64 сут	Б	9,2–10	2,2+07	8,7+03
		П	3,0–09	6,7+06	2,7+03
Sn –126	1,00+05 лет	Б	1,1–08	1,8+06	7,3+02
		П	2,7–08	7,4+05	3,0+02
Sn –127	2,10 час	Б	6,9–11	2,9+08	1,2+05
		П	1,3–10	1,5+08	6,2+04
Sn –128	0,985 час	Б	5,4–11	3,7+08	1,5+05
		П	9,6–11	2,1+08	8,3+04
Sb –115	0,530 час	Б	9,2–12	2,2+09	8,7+05
		П	1,4–11	1,4+09	5,7+05
Sb –116	0,263 час	Б	9,9–12	2,0+09	8,1+05
		П	1,4–11	1,4+09	5,7+05
Sb –116 m	1,00 час	Б	3,5–11	5,7+08	2,3+05
		П	5,0–11	4,0+08	1,6+05
Sb –117	2,80 час	Б	9,3–12	2,2+09	8,6+05
		П	1,7–11	1,2+09	4,7+05
Sb –118 m	5,00 час	Б	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		П	1,3–10	1,5+08	6,2+04
Sb –119	1,59 сут	Б	2,5–11	8,0+08	3,2+05
		П	3,7–11	5,4+08	2,2+05
Sb –120	5,76 сут	Б	5,9–10	3,4+07	1,4+04
		П	1,0–09	2,0+07	8,0+03
Sb –120	0,265 час	Б	4,9–12	4,1+09	1,6+06
		П	7,4–19	2,7+09	1,1+06
Sb –122	2,70 сут	Б	3,9–10	5,1+07	2,1+04
		П	1,0–09	2,0+07	8,0+03
Sb –124	60,2 сут	Б	1,3–09	1,5+07	6,2+03
		П	6,1–09	3,3+06	1,3+03
Sb –124 m	0,337 час	Б	3,0–12	6,7+09	2,7+06
		П	5,5–12	3,6+09	1,5+06

Sb –125	2,77 лет	Б	1,4–09	1,4+07	5,7+03
		П	4,5–09	4,4+06	1,8+03
Sb –126	12,4 сут	Б	1,1–09	1,8+07	7,3+03
		П	2,7–09	7,4+06	3,0+03
Sb –126 m	0,317 час	Б	1,3–11	1,5+09	6,2+05
		П	2,0–11	1,0+09	4,0+05
Sb –127	3,85 сут	Б	4,6–10	4,3+07	1,7+04
		П	1,6–09	1,3+07	5,0+03
Sb –128	9,01 час	Б	2,5–10	8,0+07	3,2+04
		П	4,2–10	4,8+07	1,9+04
Sb –128	0,173 час	Б	1,1–11	1,8+09	7,3+05
		П	1,5–11	1,3+09	5,3+05
Sb –129	4,32 час	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		П	2,4–10	8,3+07	3,3+04
Sb –130	0,667 час	Б	3,5–11	5,7+08	2,3+05
		П	5,4–11	3,7+08	1,5+05
Sb –131	0,383 час	Б	3,7–11	5,4+08	2,2+05
		П	5,2–11	3,8+08	1,5+05
Te –116	2,49 час	Б	6,3–11	3,2+08	1,3+05
		П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		Г	8,7–11	2,3+08	9,2+04
Te –121	17,0 сут	Б	2,5–10	8,0+07	3,2+04
		П	3,9–10	5,1+07	2,1+04
		Г	5,1–10	3,9+07	1,6+04
Te –121 m	154 сут	Б	1,8–09	1,1+07	4,4+03
		П	4,2–09	4,8+06	1,9+03
		Г	5,5–09	3,6+06	1,5+03
Te –123	1,00+13 лет	Б	4,0–09	5,0+06	2,0+03
		П	2,6–09	7,7+06	3,1+03
		Г	1,2–09	1,7+06	6,7+02
Te –123 m	120 сут	Б	9,7–10	2,1+07	8,2+03
		П	3,9–09	5,1+06	2,1+03
		Г	2,9–09	6,9+06	2,8+03
Te –125 m	58,0 сут	Б	5,1–10	3,9+07	1,6+04
		П	3,3–09	6,1+06	2,4+03
		Г	1,5–09	1,3+07	5,3+03
Te –127	9,35 час	Б	4,2–11	4,8+08	1,9+05
		П	1,2–10	1,7+08	6,7+04
		Г	7,7–11	2,6+08	1,0+05
Te –127 m	109 сут	Б	1,6–09	1,3+07	5,0+03
		П	7,2–09	2,8+06	1,1+03
		Г	4,6–09	4,3+06	1,7+03
Te –129	1,16 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		П	3,8–11	5,3+08	2,1+05
		Г	3,7–11	5,4+08	2,2+05
Te –129 m	33,6 сут	Б	1,3–09	1,5+07	6,2+03
		П	6,3–09	3,2+06	1,3+03
		Г	3,7–09	5,4+06	2,2+03
Te –131	0,417 час	Б	2,3–11	8,7+08	3,5+05
		П	3,8–11	5,3+08	2,1+05
		Г	6,8–11	2,9+08	1,2+05
Te –131 m	1,25 сут	Б	8,7–10	2,3+07	9,2+03
		П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
		Г	2,4–09	8,3+06	3,3+03
Te –132	3,26 сут	Б	1,8–09	1,1+07	4,4+03
		П	2,2–09	9,1+06	3,6+03
		Г	5,1–09	3,9+06	1,6+03
Te –133	0,207 час	Б	2,0–11	1,0+09	4,0+05
		П	2,7–11	7,4+08	3,0+05
		Г	5,6–11	3,6+08	1,4+05
Te –133m	0,923 час	Б	8,4–11	2,4+08	9,5+04

		П	1,2–10	1,7+08	6,7+04
		Г	2,2–10	9,1+07	3,6+04
Te-134	0,696 час	Б	5,0–11	4,0+08	1,6+05
		П	7,1–11	2,8+08	1,1+05
		Г	8,4–11	2,4+08	9,5+04
I-120	1,35 час	Б	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		Г1	3,0–10	6,7+07	2,7+04
		Г2	2,0–10	1,0+08	4,0+04
I-120m	0,883 час	Б	8,7–11	2,3+08	9,2+04
		Г1	1,8–10	1,1+08	4,4+04
		Г2	1,0–10	2,0+08	8,0+04
I-121	2,12 час	Б	2,8–11	7,1+08	2,9+05
		Г1	8,6–11	2,3+08	9,3+04
		Г2	5,6–11	3,6+08	1,4+05
I-123	13,2 час	Б	7,6–11	2,6+08	1,1+05
		Г1	2,1–10	9,5+07	3,8+04
		Г2	1,5–10	1,3+08	5,3+04
I-124	4,18 сут	Б	4,5–09	4,4+06	1,8+03
		Г1	1,2–08	1,7+06	6,7+02
		Г2	9,2–09	2,2+06	8,7+02
I-125	60,1 сут	Б	5,3–09	3,8+06	1,5+03
		Г1	1,4–08	1,4+06	5,7+02
		Г2	1,1–08	1,8+06	7,3+02
I-126	13,0 сут	Б	1,0–08	2,0+06	8,0+02
		Г1	2,6–08	7,7+05	3,1+02
		Г2	2,0–08	1,0+06	4,0+02
I-128	0,416 час	Б	1,4–11	1,4+09	5,7+05
		Г1	6,5–11	3,1+08	1,2+05
		Г2	1,3–11	1,5+09	6,2+05
I-129	1,57+07 лет	Б	3,7–08	5,4+05	2,2+02
		Г1	9,6–08	2,1+05	8,3+01
		Г2	7,4–08	2,7+05	1,1+02
I-130	12,4 час	Б	6,9–10	2,9+07	1,2+04
		Г1	1,9–09	1,1+07	4,2+03
		Г2	1,4–09	1,4+07	5,7+03
I-131	8,04 сут	Б	7,6–09	2,6+06	1,1+03
		Г1	2,0–08	1,0+06	4,0+02
		Г2	1,5–08	1,3+06	5,3+02
I-132	2,30 час	Б	9,6–11	2,1+08	8,3+04
		Г1	3,1–10	6,5+07	2,6+04
		Г2	1,9–10	1,1+08	4,2+04
I-132 m	1,39 час	Б	8,1–11	2,5+08	9,9+04
		Г1	2,7–10	7,4+07	3,0+04
		Г2	1,6–10	1,3+08	5,0+04
I-133	20,8 час	Б	1,5–09	1,3+07	5,3+03
		Г1	4,0–09	5,0+06	2,0+03
		Г2	3,1–09	6,5+06	2,6+03
I-134	0,876 час	Б	4,8–11	4,2+08	1,7+05
		Г1	1,5–10	1,3+08	5,3+04
		Г2	5,0–11	4,0+08	1,6+05
I-135	6,61 час	Б	3,3–10	6,1+07	2,4+04
		Г1	9,2–10	2,2+07	8,7+03
		Г2	6,8–10	2,9+07	1,2+04
Cs –125	0,750 час	Б	1,3–11	1,5+09	6,2+05
Cs –127	6,25 час	Б	2,2–11	9,1+08	3,6+05
Cs –129	1,34 сут	Б	4,5–11	4,4+08	1,8+05
Cs –130	0,498 час	Б	8,4–12	2,4+09	9,5+05
Cs –131	9,69 сут	Б	2,8–11	7,1+08	2,9+05
Cs –132	6,48 сут	Б	2,4–10	8,3+07	3,3+04
Cs –134	2,06 лет	Б	6,8–09	2,9+06	1,2+03

Cs-134m	2,90 час	Б	1,5-11	1,3+09	5,3+05
Cs -135	2,30+06 лет	Б	7,1-10	2,8+07	1,1+04
Cs -135 m	0,883 час	Б	1,3-11	1,5+09	6,2+05
Cs -136	13,1 сут	Б	1,3-09	1,5+07	6,2+03
Cs -137	30,0 лет	Б	4,8-09	4,2+06	1,7+03
Cs -138	0,536 час	Б	2,6-11	7,7+08	3,1+05
Ba-126	1,61 час	Б	7,8-11	2,6+08	1,0+05
Ba-128	2,43 сут	Б	8,0-10	2,5+07	1,0+04
Ba-131	11,8 сут	Б	2,3-10	8,7+07	3,5+04
Ba-131 m	0,243 час	Б	4,1-12	4,9+09	2,0+06
Ba-133	10,7 лет	Б	1,5-09	1,3+07	5,3+03
Ba-133m	1,62 сут	Б	1,9-10	1,1+08	4,2+04
Ba-135m	1,20 сут	Б	1,5-10	1,3+08	5,3+04
Ba-139	1,38 час	Б	3,5-11	5,7+08	2,3+05
Ba-140	12,7 сут	Б	1,0-09	2,0+07	8,0+03
Ba-141	0,305 час	Б	2,2-11	9,1+08	3,6+05
Ba-142	0,177 час	Б	1,6-11	1,3+09	5,0+05
La -131	0,983 час	Б	1,4-11	1,4+09	5,7+05
		П	2,3-11	8,7+08	3,5+05
La -132	4,80 час	Б	1,1-10	1,8+08	7,3+04
		П	1,7-10	1,2+08	4,7+04
La -135	19,5 час	Б	1,1-11	1,8+09	7,3+05
		П	1,5-11	1,3+09	5,3+05
La -137	6,00+04 лет	Б	8,6-09	2,3+06	9,3+02
		П	3,4-09	5,9+06	2,4+03
La -138	1,35+11 лет	Б	1,5-07	1,3+05	5,3+01
		П	6,1-08	3,3+05	1,3+02
La -140	1,68 сут	Б	6,0-10	3,3+07	1,3+04
		П	1,1-09	1,8+07	7,3+03
La -141	3,93 час	Б	6,7-11	3,0+08	1,2+05
		П	1,5-10	1,3+08	5,3+04
La -142	1,54 час	Б	5,6-11	3,6+08	1,4+05
		П	9,3-11	2,2+08	8,6+04
La -143	0,237 час	Б	1,2-11	1,7+09	6,7+05
		П	2,2-11	9,1+08	3,6+05
Ce -134	3,00 сут	П	1,3-09	1,5+07	6,2+03
		М	1,3-09	1,5+07	6,2+03
Ce -135	17,6 час	П	4,9-10	4,1+07	1,6+04
		М	5,1-10	3,9+07	1,6+04
Ce -137	9,00 час	П	1,0-11	2,0+09	8,0+05
		М	1,1-11	1,8+09	7,3+05
Ce -137 m	1,43 сут	П	4,0-10	5,0+07	2,0+04
		М	4,3-10	4,7+07	1,9+04
Ce-139	138 сут	П	1,6-09	1,3+07	5,0+03
		М	1,8-09	1,1+07	4,4+03
Ce-141	32,5 сут	П	3,1-09	6,5+06	2,6+03
		М	3,6-09	5,6+06	2,2+03
Ce-143	1,38 сут	П	7,4-10	2,7+07	1,1+04
		М	8,1-10	2,5+07	9,9+03
Ce-144	284 сут	П	3,4-08	5,9+05	2,4+02
		М	4,9-08	4,1+05	1,6+02
Pr-136	0,218 час	П	1,4-11	1,4+09	5,7+05
		М	1,5-11	1,3+09	5,3+05
Pr-137	1,28 час	П	2,1-11	9,5+08	3,8+05
		М	2,2-11	9,1+08	3,6+05
Pr -138 m	2,10 час	П	7,6-11	2,6+08	1,1+05
		М	7,9-11	2,5+08	1,0+05
Pr-139	4,51 час	П	1,9-11	1,1+09	4,2+05
		М	2,0-11	1,0+09	4,0+05
Pr-142	19,1 час	П	5,3-10	3,8+07	1,5+04

		М	5,6–10	3,6+07	1,4+04
Pr –142 m	0,243 час	П	6,7–12	3,0+09	1,2+06
		М	7,1–12	2,8+09	1,1+06
Pr–143	13,6 сут	П	2,1–09	9,5+06	3,8+03
		М	2,3–09	8,7+06	3,5+03
Pr–144	0,288 час	П	1,8–11	1,1+09	4,4+05
		М	1,9–11	1,1+09	4,2+05
Pr–145	5,98 час	П	1,6–10	1,3+08	5,0+04
		М	1,7–10	1,2+08	4,7+04
Pr–147	0,227 час	П	1,8–11	1,1+09	4,4+05
		М	1,9–11	1,1+09	4,2+05
Nd –136	0,844 час	П	5,3–11	3,8+08	1,5+05
		М	5,6–11	3,6+08	1,4+05
Nd –138	5,04 час	П	2,4–10	8,3+07	3,3+04
		М	2,6–10	7,7+07	3,1+04
Nd –139	0,495 час	П	1,0–11	2,0+09	8,0+05
		М	1,1–11	1,8+09	7,3+05
Nd –139 m	5,50 час	П	1,5–10	1,3+08	5,3+04
		М	1,6–10	1,3+08	5,0+04
Nd –141	2,49 час	П	5,1–12	3,9+09	1,6+06
		М	5,3–12	3,8+09	1,5+06
Nd –147	11,0 сут	П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
		М	2,3–09	8,7+06	3,5+03
Nd –149	1,73 час	П	8,5–11	2,4+08	9,4+04
		М	9,0–11	2,2+08	8,9+04
Nd –151	0,207 час	П	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		М	1,8–11	1,1+09	4,4+05
Pm –141	0,348 час	П	1,5–11	1,3+09	5,3+05
		М	1,6–11	1,3+09	5,0+05
Pm –143	265 сут	П	1,4–09	1,4+07	5,7+03
		М	1,3–09	1,5+07	6,2+03
Pm –144	363 сут	П	7,8–09	2,6+06	1,0+03
		М	7,0–09	2,9+06	1,1+03
Pm –145	17,7 лет	П	3,4–09	5,9+06	2,4+03
		М	2,1–09	9,5+06	3,8+03
Pm –146	5,53 лет	П	1,9–08	1,1+06	4,2+02
		М	1,6–08	1,3+06	5,0+02
Pm –147	2,62 лет	П	4,7–09	4,3+06	1,7+03
		М	4,6–09	4,3+06	1,7+03
Pm –148	5,37 сут	П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
		М	2,1–09	9,5+06	3,8+03
Pm –148 m	41,3 сут	П	4,9–09	4,1+06	1,6+03
		М	5,4–09	3,7+06	1,5+03
Pm –149	2,21 сут	П	6,6–10	3,0+07	1,2+04
		М	7,2–10	2,8+07	1,1+04
Pm –150	2,68 час	П	1,3–10	1,5+08	6,2+04
		М	1,4–10	1,4+08	5,7+04
Pm –151	1,18 сут	П	4,2–10	4,8+07	1,9+04
		М	4,5–10	4,4+07	1,8+04
Sm –141	0,170 час	П	1,6–11	1,3+09	5,0+05
Sm –141 m	0,377 час	П	3,4–11	5,9+08	2,4+05
Sm –142	1,21 час	П	7,4–11	2,7+08	1,1+05
Sm –145	340 сут	П	1,5–09	1,3+07	5,3+03
Sm –146	1,03+08 лет	П	9,9–06	2,0+03	8,1–01
Sm –151	90,0 лет	П	3,7–09	5,4+06	2,2+03
Sm –153	1,95 сут	П	6,1–10	3,3+07	1,3+04
Sm –155	0,368 час	П	1,7–11	1,2+09	4,7+05
Sm –156	9,40 час	П	2,1–10	9,5+07	3,8+04
Eu –145	5,94 сут	П	5,6–10	3,6+07	1,4+04
Eu –146	4,61 сут	П	8,2–10	2,4+07	9,8+03

Eu –147	24,0 сут	П	1,0–09	2,0+07	8,0+03
Eu –148	54,5 сут	П	2,7–09	7,4+06	3,0+03
Eu –149	93,1 сут	П	2,7–10	7,4+07	3,0+04
Eu –150	34,2 лет	П	5,0–08	4,0+05	1,6+02
Eu –150	12,6 час	П	1,9–10	1,1+08	4,2+04
Eu –152	13,3 лет	П	3,9–08	5,1+05	2,1+02
Eu–152m	9,32 час	П	2,2–10	9,1+07	3,6+04
Eu –154	8,80 лет	П	5,0–08	4,0+05	1,6+02
Eu –155	4,96 лет	П	6,5–09	3,1+06	1,2+03
Eu –156	15,2 сут	П	3,3–09	6,1+06	2,4+03
Eu –157	15,1 час	П	3,2–10	6,3+07	2,5+04
Eu –158	0,765 час	П	4,8–11	4,2+08	1,7+05
Gd –145	0,382 час	Б	1,5–11	1,3+09	5,3+05
		П	2,1–11	9,5+08	3,8+05
Gd –146	48,3 сут	Б	4,4–09	4,5+06	1,8+03
		П	6,0–09	3,3+06	1,3+03
Gd –147	1,59 сут	Б	2,7–10	7,4+07	3,0+04
		П	4,1–10	4,9+07	2,0+04
Gd –148	93,0 лет	Б	2,5–05	8,0+02	3,2–01
		П	1,1–05	1,8+03	7,3–01
Gd –149	9,40 сут	Б	2,6–10	7,7+07	3,1+04
		П	7,0–10	2,9+07	1,1+04
Gd –151	120 сут	Б	7,8–10	2,6+07	1,0+04
		П	8,1–10	2,5+07	9,9+03
Gd –152	1,08+14 лет	Б	1,9–05	1,1+03	4,2–01
		П	7,4–06	2,7+03	1,1
Gd –153	242 сут	Б	2,1–09	9,5+06	3,8+03
		П	1,9–09	1,1+07	4,2+03
Gd –159	18,6 час	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		П	2,7–10	7,4+07	3,0+04
Tb –147	1,65 час	П	7,9–11	2,5+08	1,0+05
Tb –149	4,15 час	П	4,3–09	4,7+06	1,9+03
Tb –150	3,27 час	П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
Tb –151	17,6 час	П	2,3–10	8,7+07	3,5+04
Tb –153	2,34 сут	П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
Tb –154	21,4 час	П	3,8–10	5,3+07	2,1+04
Tb –155	5,32 сут	П	2,1–10	9,5+07	3,8+04
Tb –156	5,34 сут	П	1,2–09	1,7+07	6,7+03
Tb –156 m	1,02 сут	П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
Tb–156m	5,00 час	П	9,2–11	2,2+08	8,7+04
Tb –157	1,50+02 лет	П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Tb –158	1,50+02 лет	П	4,3–08	4,7+05	1,9+02
Tb –160	72,3 сут	П	6,6–09	3,0+06	1,2+03
Tb –161	6,91 сут	П	1,2–09	1,7+07	6,7+03
Dy –155	10,0 час	П	8,0–11	2,5+08	1,0+05
Dy –157	8,10 час	П	3,2–11	6,3+08	2,5+05
Dy –159	144 сут	П	3,5–10	5,7+07	2,3+04
Dy –165	2,33 час	П	6,1–11	3,3+08	1,3+05
Dy –166	3,40 сут	П	1,8–09	1,1+07	4,4+03
Ho –155	0,800 час	П	2,0–11	1,0+09	4,0+05
Ho –157	0,210 час	П	4,5–12	4,4+09	1,8+06
Ho –159	0,550 час	П	6,3–12	3,2+09	1,3+06
Ho –161	2,50 час	П	6,3–12	3,2+09	1,3+06
Ho –162	0,250 час	П	2,9–12	6,9+09	2,8+06
Ho –162 m	1,13 час	П	2,2–11	9,1+08	3,6+05
Ho –164	0,483 час	П	8,6–12	2,3+09	9,3+05
Ho–164 m	0,625 час	П	1,2–11	1,7+09	6,7+05
Ho –166	1,12 сут	П	6,6–10	3,0+07	1,2+04
Ho –166 m	1,20+03 лет	П	1,1–07	1,8+05	7,3+01

Ho –167	3,10 час	П	7,1–11	2,8+08	1,1+05
Er –161	3,24 час	П	5,1–11	3,9+08	1,6+05
Er –165	10,4 час	П	8,3–12	2,4+09	9,6+05
Er –169	9,30 сут	П	9,8–10	2,0+07	8,2+03
Er –171	7,52 час	П	2,2–10	9,1+07	3,6+04
Er –172	2,05 сут	П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Tm –162	0,362 час	П	1,6–11	1,3+09	5,0+05
Tm –166	7,70 час	П	1,8–10	1,1+08	4,4+04
Tm –167	9,24 сут	П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Tm –170	129 сут	П	6,6–09	3,0+06	1,2+03
Tm –171	1,92 лет	П	1,3–09	1,5+07	6,2+03
Tm –172	2,65 сут	П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Tm –173	8,24 час	П	1,8–10	1,1+08	4,4+04
Tm –175	0,253 час	П	1,9–11	1,1+09	4,2+05
Yb –162	0,315 час	П	1,4–11	1,4+09	5,7+05
		М	1,4–11	1,4+09	5,7+05
Yb –166	2,36 сут	П	7,2–10	2,8+07	1,1+04
		М	7,6–10	2,6+07	1,1+04
Yb –167	0,292 час	П	6,5–12	3,1+09	1,2+06
		М	6,9–12	2,9+09	1,2+06
Yb –169	32,0 сут	П	2,4–09	8,3+06	3,3+03
		М	2,8–09	7,1+06	2,9+03
Yb –175	4,19 сут	П	6,3–10	3,2+07	1,3+04
		М	7,0–10	2,9+07	1,1+04
Yb –177	1,90 час	П	6,4–11	3,1+08	1,3+05
		М	6,9–11	2,9+08	1,2+05
Yb –178	1,23 час	П	7,1–11	2,8+08	1,1+05
		М	7,6–11	2,6+08	1,1+05
Lu –169	1,42 сут	П	3,5–10	5,7+07	2,3+04
		М	3,8–10	5,3+07	2,1+04
Lu –170	2,00 сут	П	6,4–10	3,1+07	1,3+04
		М	6,7–10	3,0+07	1,2+04
Lu –171	8,22 сут	П	7,6–10	2,6+07	1,1+0,4
		М	8,3–10	2,4+07	9,6+03
Lu –172	6,70 сут	П	1,4–09	1,4+07	5,7+03
		М	1,5–09	1,3+07	5,3+03
Lu –173	1,37 лет	П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
		М	2,3–09	8,7+06	3,5+03
Lu –174	3,31 лет	П	4,0–09	5,0+06	2,0+03
		М	3,9–09	5,1+06	2,1+03
Lu –174 m	142 сут	П	3,4–09	5,9+06	2,4+03
		М	3,8–09	5,3+06	2,1+03
Lu –176	3,60+10 лет	П	6,6–08	3,0+05	1,2+02
		М	5,2–08	3,8+05	1,5+02
Lu –176 m	3,68 час	П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Lu –177	6,71 сут	П	1,0–09	2,0+07	8,0+03
		М	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Lu –177 m	161 сут	П	1,2–08	1,7+06	6,7+02
		М	1,5–08	1,3+06	5,3+02
Lu –178	0,473 час	П	2,5–11	8,0+08	3,2+05
		м	2,6–11	7,7+08	3,1+05
Lu –178 m	0,378 час	П	3,3–11	6,1+08	2,4+05
		М	3,5–11	5,7+08	2,3+05
Lu –179	4,59 час	П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Hf –170	16,0 час	Б	1,7–10	1,2+08	4,7+04
		П	3,2–10	6,3+07	2,5+04
H f –172	1,87 лет	Б	3,2–08	6,3+05	2,5+02
		П	1,9–08	1,1+06	4,2+02

Hf –173	24,0 час	Б	7,9–11	2,5+08	1,0+05
		П	1,6–10	1,3+08	5,0+04
H f –175	70,0 сут	Б	7,2–10	2,8+07	1,1+04
		П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Hf –177 m	0,856 час	Б	4,7–11	4,3+08	1,7+05
		П	9,2–11	2,2+08	8,7+04
Hf –178 m	31,0 лет	Б	2,6–07	7,7+04	3,1+01
		П	1,1–07	1,8+05	7,3+01
Hf –179 m	25,1 сут	Б	1,1–09	1,8+07	7,3+03
		П	3,6–09	5,6+06	2,2+03
Hf –180 m	5,50 час	Б	6,4–11	3,1+08	1,3+05
		П	1,4–10	1,4+08	5,7+04
Hf –181	42,4 сут	Б	1,4–09	1,4+07	5,7+03
		П	4,7–09	4,3+06	1,7+03
Hf –182	9,00+06 лет	Б	3,0–07	6,7+04	2,7+01
		П	1,2–07	1,7+05	6,7+01
Hf –182 m	1,02 час	Б	2,3–11	8,7+08	3,5+05
		П	4,7–11	4,3+08	1,7+05
Hf –183	1,07 час	Б	2,6–11	7,7+08	3,1+05
		П	5,8–11	3,4+08	1,4+05
Hf –184	4,12 час	Б	1,3–10	1,5+08	6,2+04
		П	3,3–10	6,1+07	2,4+04
Ta –172	0,613 час	П	3,4–11	5,9+08	2,4+05
		М	3,6–11	5,6+08	2,2+05
Ta –173	3,65 час	П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Ta –174	1,20 час	П	4,2–11	4,8+08	1,9+05
		М	4,4–11	4,5+08	1,8+05
Ta –175	10,5 час	П	1,3–10	1,5+08	6,2+04
		М	1,4–10	1,4+08	5,7+04
Ta –176	8,08 час	П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
		М	2,1–10	9,5+07	3,8+04
Ta –177	2,36 сут	П	9,3–11	2,2+08	8,6+04
		М	1,0–10	2,0+08	8,0+04
Ta –178	2,20 час	П	6,6–11	3,0+08	1,2+05
		М	6,9–11	2,9+08	1,2+05
Ta –179	1,82 лет	П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
		М	5,2–10	3,8+07	1,5+04
Ta –180	1,00+13 лет	П	6,0–09	3,3+06	1,3+03
		М	2,4–08	8,3+05	3,3+02
Ta –180 m	8,10 час	П	4,4–11	4,5+08	1,8+05
		М	4,7–11	4,3+08	1,7+05
Ta –182	115 сут	П	7,2–09	2,8+06	1,1+03
		М	9,7–09	2,1+06	8,2+02
Ta –182m	0,264 час	П	2,1–11	9,5+08	3,8+05
		М	2,2–11	9,1+08	3,6+05
Ta –183	5,10 сут	П	1,8–09	1,1+07	4,4+03
		М	2,0–09	1,0+07	4,0+03
Ta –184	8,70 час	П	4,1–10	4,9+07	2,0+04
		М	4,4–10	4,5+07	1,8+04
Ta –185	0,816 час	П	4,6–11	4,3+08	1,7+05
		М	4,9–11	4,1+08	1,6+05
Ta –186	0,175 час	П	1,8–11	1,1+09	4,4+05
		М	1,9–11	1,1+09	4,2+05
W –176	2,30 час	Б	4,4–11	4,5+08	1,8+05
W –177	2,25 час	Б	2,6–11	7,7+08	3,1+05
W –178	21,7 сут	Б	7,6–11	2,6+08	1,1+05
W –179	0,625 час	Б	9,9–13	2,0+10	8,1+06
W –181	121 сут	Б	2,8–11	7,1+08	2,9+05
W –185	75,1 сут	Б	1,4–10	1,4+08	5,7+04

W –187	23,9 час	Б	2,0–10	1,0+08	4,0+04
W –188	69,4 сут	Б	5,9–10	3,4+07	1,4+04
Re –177	0,233 час	Б	1,0–11	2,0+09	8,0+05
		П	1,4–11	1,4+09	5,7+05
Re –178	0,220 час	Б	1,1–11	1,8+09	7,3+05
		П	1,5–11	1,3+09	5,3+05
Re –181	20,0 час	Б	1,9–10	1,1+08	4,2+04
		П	2,5–10	8,0+07	3,2+04
Re –182	2,67 сут	Б	6,8–10	2,9+07	1,2+04
		П	1,3–09	1,5+07	6,2+03
Re –182	12,7 час	Б	1,5–10	1,3+08	5,3+04 4
		П	2,0–10	1,0+08	4,0+04
Re –184	38,0 сут	Б	4,6–10	4,3+07	1,7+04
		П	1,8–09	1,1+07	4,4+03
Re –184 m	165 сут	Б	6,1–10	3,3+07	1,3+04
		П	6,1–09	3,3+06	1,3+03
Re –186	3,78 сут	Б	5,3–10	3,8+07	1,5+04
		П	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Re –186 m	2,00+05 лет	Б	8,5–10	2,4+07	9,4+03
		П	1,1–08	1,8+06	7,3+02
Re –188	17,0 час	Б	4,7–10	4,3+07	1,7+04
		П	5,5–10	3,6+07	1,5+04
Re –188 m	0,310 час	Б	1,0–11	2,0+09	8,0+05
		П	1,4–11	1,4+09	5,7+05
Re –189	1,01 сут	Б	2,7–10	7,4+07	3,0+04
		П	4,3–10	4,7+07	1,9+04
Os –180	0,366 час	Б	8,8–12	2,3+09	9,1+05
		П	1,4–11	1,4+09	5,7+05
		М	1,5–11	1,3+09	5,3+05
Os –181	1,75 час	Б	3,6–11	5,6+08	2,2+05
		П	6,3–11	3,2+08	1,3+05
		М	6,6–11	3,0+08	1,2+05
Os –182	22,0 час	Б	1,9–10	1,1+08	4,2+04
		П	3,7–10	5,4+07	2,2+04
		М	3,9–10	5,1+07	2,1+04
Os –185	94,0 сут	Б	1,1–09	1,8+07	7,3+03
		П	1,2–09	1,7+07	6,7+03
		М	1,5–09	1,3+07	5,3+03
Os –189 m	6,00 час	Б	2,7–12	7,4+09	3,0+06
		П	5,1–12	3,9+09	1,6+06
		М	5, 4–12	3,7+09	1,5+06
Os –191	15,4 сут	Б	2,5–10	8,0+07	3,2+04
		П	1,5–09	1,3+07	5,3+03
		М	1,8–09	1,1+07	4,4+03
Os–191m	13,0 час	Б	2,6–11	7,7+08	3,1+05
		П	1,3–10	1,5+08	6,2+04
		М	1,5–10	1,3+08	5,3+04
Os –193	1,25 сут	Б	1,7–10	1,2+08	4,7+04
		П	4,7–10	4,3+07	1,7+04
		М	5,1–10	3,9+07	1,6+04
Os –194	6,00 лет	Б	1,1–08	1,8+06	7,3+02
		П	2,0–08	1,0+06	4,0+02
		М	7,9–08	2,5+05	1,0+02
Ir –182	0,250 час	Б	1,5–11	1,3+09	5,3+05
		П	2,4–11	8,3+08	3,3+05
		М	2,5–11	8,8+08	3,2+05
Ir –184	3,02 час	Б	6,7–11	3,0+08	1,2+05
		П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	1,2–10	1,7+08	6,7+04

lr –185	14,0 час	Б	8,8–11	2,3+08	9,1+04
		П	1,8–10	1,1+08	4,4+04
		М	1,9–10	1,1+08	4,2+04
lr –186	15,8 час	Б	1,8–10	1,1+08	4,4+04
		П	3,2–10	6,3+07	2,5+04
		М	3,3–10	6,1+07	2,4+04
lr –186	1,75 час	Б	2,5–11	8,0+08	3,2+05
		П	4,3–11	4,7+08	1,9+05
		М	4 5–11	4,4+08	1,8+05
lr –187	10,5 час	Б	4,0–11	5,0+08	2,0+05
		П	7,5–11	2,7+08	1,1+05
		М	7,9–11	2,5+08	1,0+05
lr –188	1,73 сут	Б	2,6–10	7,7+07	3,1+04
		П	4,1–10	4,9+07	2,0+04
		М	4,3–10	4,7+07	1,9+04
lr –189	13,3 сут	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		П	4,8–10	4,2+07	1,7+04
		М	5,5–10	3,6+07	1,5+04
lr –190	12,1 сут	Б	7,9–10	2,5+07	1,0+04
		П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
		М	2,3–09	8,7+06	3,5+03
lr–190m	3,10 час	Б	5,3–11	3,8+08	1,5+05
		П	8,3–11	2,4+08	9,6+04
		М	8,6–11	2,3+08	9,3+04
lr –190 m	1,20 час	Б	3,7–12	5,4+09	2,2+06
		П	9,0–12	2,2+09	8,9+05
		М	1,0–11	2,0+09	8,0+05
lr –192	74,0 сут	Б	1,8–09	1,1+07	4,4+03
		П	4,9–09	4,1+06	1,6+03
		М	6,2–09	3,2+06	1,3+03
lr–192m	2,41+02 лет	Б	4,8–09	4,2+06	1,7+03
		П	5,4–09	3,7+06	1,5+03
		М	3,6–08	5,6+05	2,2+02
lr –193 m	11,9 сут	Б	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		П	1,0–09	2,0+07	8,0+03
		М	1,2–09	1,7+07	6,7+03
lr –194	19,1 час	Б	2,2–10	9,1+07	3,6+04
		П	5,3–10	3,8+07	1,5+04
		М	5,6–10	3,6+07	1,4+04
lr–194m	171 сут	Б	5,4–09	3,7+06	1,5+03
		П	8,5–09	2,4+06	9,4+02
		М	1,2–08	1,7+06	6,7+02
lr –195	2,50 час	Б	2,6–11	7,7+08	3,1+05
		П	6,7–11	3,0+08	1,2+05
		М	7,2–11	2,8+08	1,1+05
lr–195m	3,80 час	Б	6,5–11	3,1+08	1,2+05
		П	1,6–10	1,3+08	5,0+04
		М	1,7–10	1,2+08	4,7+04
Pt –186	2,00 час	Б	3,6–11	5,6+08	2,2+05
Pt –188	10,2 сут	Б	4,3–10	4,7+07	1,9+04
Pt –189	10,9 час	Б	4,1–11	4,9+08	2,0+05
Pt –191	2,80 сут	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
Pt –193	50,0 лет	Б	2,1–11	9,5+08	3,8+05
Pt –193 m	4,33 сут	Б	1,3–10	1,5+08	6,2+04
Pt–195m	4,02 сут	Б	1,9–10	1,1+08	4,2+04
R –197	18,3 час	Б	9,1–11	2,2+08	8,8+04
Pt –197 m	1,57 час	Б	2,5–11	8,0+08	3,2+05
Pt –199	0,513 час	Б	1,3–11	1,5+09	6,2+05
Pt –200	12,5 час	Б	2,4–10	8,3+07	3,3+04

Au –193	17,6 час	Б	3,9–11	5,1+08	2,1+05
		П	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		М	1,2–10	1,7+08	6,7+04
Au –194	1,64 сут	Б	1,5–10	1,3+08	5,3+04
		П	2,4–10	8,3+07	3,3+04
		М	2,5–10	8,0+07	3,2+04
Au –195	183 сут	Б	7,1–11	2,8+08	1,1+05
		П	1,0–09	2,0+07	8,0+03
		М	1,6–09	1,3+07	5,0+03
Au –198	2,69 сут	Б	2,3–10	8,7+07	3,5+04
		П	7,6–10	2,6+07	1,1+04
		М	8,4–10	2,4+07	9,5+03
Au–198m	2,30 сут	Б	3,4–10	5,9+07	2,4+04
		П	1,7–09	1,2+07	4,7+03
		М	1,9–09	1,1+07	4,2+03
Au –199	3,14 сут	Б	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		П	6,8–10	2,9+07	1,2+04
		М	7,5–10	2,7+07	1,1+04
Au –200	0,807 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		П	3,5–11	5,7+08	2,3+05
		М	3,6–11	5,6+08	2,2+05
Au –200 m	18,7 час	Б	3,2–10	6,3+07	2,5+04
		П	6,9–10	2,9+07	1,2+04
		М	7,3–10	2,7+07	1,1+04
Au –201	0,440 час	Б	9,2–12	2,2+09	8,7+05
		П	1,7–11	1,2+09	4,7+05
		М	1,8–11	1,1+09	4,4+05
Hg –193	3,50 час	Б (ор)	2,6–11	7,7+08	3,1+05
		Б (но)	2,8–11	7,1+08	2,9+05
		П (но)	7,5–11	2,7+08	1,1+05
		Г	1,1–09	1,8+07	7,3+03
Hg –193 m	11,1 час	Б (ор)	1,1–10	1,8+08	7,3+04
		Б (но)	1,2–10	1,7+08	6,7+04
		П (но)	2,6–10	7,7+07	3,1+04
		Г	3,1–09	6,5+06	2,6+03
Hg –194	2,60+02 лет	Б (ор)	1,5–08	1,3+06	5,3+02
		Б (но)	1,3–08	1,5+06	6,2+02
		П (но)	7,8–09	2,6+06	1,0+03
		Г	4,0–08–	5,0+05	2,0+02
Hg –195	9,90 час	Б (ор)	2,4–11	8,3+08	3,3+05
		Б (но)	2,7–11	7,4+08	3,0+05
		П (но)	7,2–11	2,8+08	1,1+05
		Г	1,4–09	1,4+07	5,7+03
Hg –195 m	1,73 сут	Б (ор)	1,3–10	1,5+08	6,2+04
		Б (но)	1,5–10	1,3+08	5,3+04
		П (но)	5,1–10	3,9+07	1,6+04
		Г	8,2–09	2,4+06	9,8+02
Hg –197	2,67 сут	Б (ор)	5,0–11	4,0+08	1,6+05
		Б (но)	6,0–11	3,3+08	1,3+05
		П (но)	2,9–10	6,9+07	2,8+04
		Г	4,4–09	4,5+06	1,8+03
Hg –197 m	23,8 час	Б (ор)	1,0–10	2,0+08	8,0+04
		Б (но)	1,2–10	1,7+08	6,7+04
		П (но)	5–1–10	3,9+07	1,6+04
		Г	5,8–09	3,4+06	1,4+03
H g –199m	0,710 час	Б (ор)	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		Б (но)	1,6–11	1,3+09	5,0+05
		П (но)	3,3–11	6,1+08	2,4+05
		Г	1,8–10	1,1+08	4,4+04
H g –203	46,6 сут	Б (ор)	5,7–10	3,5+07	1,4+04
		Б (но)	4,7–10	4,3+07	1,7+04

		П (но)	2,3–09	8,7+06	3,5+03
		Г	7,0–09	2,9+06	1,1+03
Tl–194	0,550 час	Б	4,8–12	4,2+09	1,7+06
Tl–194 m	0,546 час	Б	2,0–11	1,0+09	4,0+05
Tl–195	1,16 час	Б	1,6–11	1,3+09	5,0+05
Tl–197	2,84 час	Б	1,5–11	1,3+09	5,3+05
Tl–198	5,30 час	Б	6,6–11	3,0+08	1,2+05
Tl–198m	1,87 час	Б	4,0–11	5,0+08	2,0+05
Tl–199	7,42 час	Б	2,0–11	1,0+09	4,0+05
Tl–200	1,09 сут	Б	1,4–10	1,4+08	5,7+04
Tl–201	3,04 сут	Б	4,7–11	4,3+08	1,7+05
Tl–202	12,2 сут	Б	2,0–10	1,0+08	4,0+04
Tl–204	3,78 лет	Б	4,4–10	4,5+07	1,8+04
Pb–195 m	0,263 час	Б	1,7–11	1,2+09	4,7+05
Pb–198	2,40 час	Б	4,7–11	4,3+08	1,7+05
Pb–199	1,50 час	Б	2,6–11	7,7+08	3,1+05
Pb–200	21,5 час	Б	1,5–10	1,3+08	5,3+04
Pb–201	9,40 час	Б	6,5–11	3,1+08	1,2+05
Pb–202	3,00+05 лет	Б	1,1–08	1,8+06	7,3+02
Pb–202 m	3,62 час	Б	6,7–11	3,0+08	1,2+05
Pb–203	2,17 сут	Б	9,1–11	2,2+08	8,8+04
Pb–205	1,43+07 лет	Б	3,4–10	5,9+07	2,4+04
Pb–209	3,25 час	Б	1,8–11	1,1+09	4,4+05
Pb–210	22,3 лет	Б	8,9–07	2,2+04	9,0
Pb–211	0,601 час	Б	3,9–09	5,1+06	2,1+03
Pb–212	10,6 час	Б	1,9–08	1,1+06	4,2+02
Pb–214	0,447 час	Б	2,9–09	6,9+06	2,8+03
Bi–200	0,606 час	Б П	2,4–11 3,4–11	8,3+08 5,9+08	3,3+05 2,4+05
Bi–201	1,80 час	Б П	4,7–11 7,0–11	4,3+08 2,9+08	1,7+05 1,1+05
Bi–202	1,67 час	Б П	4,6–11 5,8–11	4,3+08 3,4+08	1,7+05 1,4+05
Bi–203	11,8 час	Б П	2,0–10 2,8–10	1,0+08 7,1+07	4,0+04 2,9+04
Bi–205	15,3 сут	Б П	4,0–10 9,2–10	5,0+07 2,2+07	2,0+04 8,7+03
Bi–206	6,24 сут	Б П	7,9–10 1,7–09	2,5+07 1,2+07	1,0+04 4,7+03
Bi–207	38,0 лет	Б П	5,2–10 5,2–09	3,8+07 3,8+06	1,5+04 1,5+03
Bi–210	5,01 сут	Б П	1,1–09 8,4–08	1,8+07 2,4+05	7,3+03 9,5+01
Bi–210 m	3,00+06 лет	Б П	4,5–08 3,1–06	4,4+05 6,5+03	1,8+02 2,6
Bi–212	1,01 час	Б П	9,3–09 3,0–08	2,2+06 6,7+05	8,6+02 2,7+02
Bi–213	0,761 час	Б П	1,1–08 2,9–08	1,8+06 6,9+05	7,3+02 2,8+02
Bi–214	0,332 час	Б П	7,2–09 1,4–08	2,8+06 1,4+06	1,1+03 57+02
Po–203	0,612 час	Б П	2,5–11 3,6–11	8,0+08 5,6+08	3,2+05 2,2+05
Po–205	1,80 час	Б П	3,5–11 6,4–11	5,7+08 3,1+08	2,3+05 1,3+05
Po–207	5,83 час	Б П	6,3–11 8,4–11	3,2+08 2,4+08	1,3+05 9,5+04
Po–210	138 сут	Б П	6,0–07 3,0–06	3,3+04 6,7+03	1,3+01 2,7

At –207	1,80 час	Б	3,5–10	5,7+07	2,3+04
		П	2,1–09	9,5+06	3,8+03
At –211	7,21 час	Б	1,6–08	1,3+06	5,0+02
		П	9,8–08	2,0+05	8,2+01
Fr –222	0,240 час	Б	1,4–08	1,4+06	5,7+02
Fr –223	0,363 час	Б	9,1–10	2,2+07	8,8+03
Ra –223	11,4 сут	П	6,9–06	2,9+03	1,2
Ra –224	3,66 сут	П	2,9–06	6,9+03	2,8
Ra –225	14,8 сут	П	5,8–06	3,4+03	1,4
Ra –226	1,60+03 лет	П	3,2–06	6,3+03	2,5
Ra –227	0,703 час	П	2,8–10	7,1+07	2,9+04
Ra –228	5,75 лет	П	2,6–06	7,7+03	3,1
Ac–224	2,90 час	Б	1,1–08	1,8+06	7,3+02
		П	1,0–07	2,0+05	8,0+01
		М	1,2–07	1,7+05	6,7+01
Ac–225	10,0 сут	Б	8,7–07	2,3+04	9,2
		П	6,9–06	2,9+03	1,2
		М	7,9–06	2,5+03	1,0
Ac–226	1,21 сут	Б	9,5–08	2,1+05	8,4+01
		П	1,1–06	1,8+04	7,3
		М	1,2–06	1,7+04	6,7
Ac–227	21,8 лет	Б	5,4–04	3,7+01	1,5–02
		П	2,1–04	9,5+01	3,8–02
		М	6,6–05	3,0+02	1,2–01
Ac–228	6,13 час	Б	25–08	8,0+05	3,2+02
		П	1,6–08	1,3+06	5,0+02
		М	1,4–08	1,4+06	5,7+02
Th –226	0,515 час	П	5,5–08	3,6+05	1,5+02
		М	5,9–08	3,4+05	1,4+02
Th–227	18,7 сут	П	7,8–06	2,6+03	1,0
		М	9,6–06	2,1+03	8,3–01
Th –228	1,91 лет	П	3,1–05	6,5+02	2,6–01
		М	3,9–05	5,1+02	2,1–01
Th –229	7,34+03 лет	П	9,9–05	2,0+02	8,1–02
		М	6,5–05	3,1+02	1,2–01
Th –230	7,70+04 лет	П	4,0–05	5,0+02	2,0–01
		М	1,3–05	1,5+03	6,2–01
Th–231	1,06 сут	П	2,9–10	6,9+07	2,8+04
		М	3,2–10	6,3+07	2,5+04
Th–232	1,40+10 лет	П	4,2–05	4,8+02	1,9–01
		М	2,3–05	8,7+02	3,5–01
Th–234	24,1 сут	П	6,3–09	3,2+06	1,3+03
		М	7,3–09	2,7+06	1,1+03
Pa–227	0,638 час	П	7,0–08	2,9+05	1,1+02
		М	7,6–08	2,6+05	1,1+02
Pa –228	22,0 час	П	5,9–08	3,4+05	1,4+02
		М	6,9–08	2,9+05	1,2+02
Pa –230	17,4 сут	П	5,6–07	3,6+04	1,4+01
		М	7,1–07	2,8+04	1,1+01
Pa –231	3,27+04 лет	П	1,3–04	1,5+02	6,2–02
		М	3,2–05	6,3+02	2,5–01
Pa –232	1,31 сут	П	9,5–09	2,1+06	8,4+02
		М	3,2–09	6,3+06	2,5+03
Pa –233	27,0 сут	П	3,1–09	6,5+06	2,6+03
		М	3,7–09	5,4+06	2,2+03
Pa –234	6,70 час	П	3,8–10	5,3+07	2,1+04
		М	4,0–10	5,0+07	2,0+04
U –230	20,8 сут	Б	3,6–07	5,6+04	2,2+01
		П	1,2–05	1,7+03	6,7–01
		М	1,5–05	1,3+03	5,3–01

U –231	4,20 сут	Б П М	8,3–11 3,4–10 3,7–10	2,4+08 5,9+07 5,4+07	9,6+04 2,4+04 2,2+04
U –232	72,0 лет	Б П М	4,0–06 7,2–06 3,5–05	5,0+03 2,8+03 5,7+02	2,0 1,1 2,3–01
U –233	1,58+05 лет	Б П М	5,7–07 3,2–06 8,7–06	3,5+04 6,3+03 2,3+03	1,4+01 2,5 9,2–01
U –234	2,44+05 лет	Б П М	5,5–07 3,1–06 8,5–06	3,6+04 6,5+03 2,4+03	1,5+01 2,6 9,4–01
U –235	7,04+08 лет	Б П М	5,1–07 2,8–06 7,7–06	2,7+04 ^[3] 7,1+03 2,6+03	1,1+01 ^[3] 2,9 1,6
U –236	2,34+07 лет	Б П М	5,2–07 2,9–06 7,9–06	3,8+04 6,9+03 2,5+03	1,5+01 2,8 1,0
U –237	6,75 сут	Б П М	1,9–10 1,6–09 1,8–09	1,1+08 1,3+07 1,1+07	4,2+04 5,0+03 4,4+03
U –238	4,47+09 лет	Б П М	4,9–07 2,6–06 7,3–06	6,0+03 ^[3] 6,0+03 ^[3] 2,7+03	2,4 ^[3] 2,4 ^[3] 1,1
U –239	0,392 час	Б П М	1,1–11 2,3–11 2,4–11	1,8+09 8,7+08 8,3+08	7,3+05 3,5+05 3,3+05
^[3] Соответствует годовому пределу поступления урана, равного 500 мг в год и величина которого определяется химической токсичностью соединений урана.					
U –240	14,1 час	Б П М	2,1–10 5,3–10 5,7–10	9,5+07 3,8+07 3,5+07	3,8+04 1,5+04 1,4+04
Np –232	0,245 час	П	4,7–11	4,3+08	1,7+05
Np –233	0,603 час	П	1,7–12	1,2+10	4,7+06
Np –234	4,40 сут	П	5,4–10	3,7+07	1,5+04
Np –235	1,08 лет	П	4,0–10	5,0+07	2,0+04
Np –236	1,15+05 лет	П	3,0–06	6,7+03	2,7
Np –236	22,5 час	П	5,0–09	4,0+06	1,6+03
Np –237	2,14+06 лет	П	2,1–05	9,5+02	3,8–01
Np –238	2,12 сут	П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
Np –239	2,36 сут	П	9,0–10	2,2+07	8,9+03
Np –240	1,08 час	П	8,7–11	2,3+08	9,2+04
Pu –234	8,80 час	П М	1,9–08 2,2–08	1,1+06 9,1+05	4,2+02 3,6+02
Pu –235	0,422 час	П М	1,5–12 1,6–12	1,3+10 1,2+10	5,3+06 5,0+06
Pu –236	2,85 лет	П М	1,8–05 9,6–06	1,1+03 2,1+03	4,4–01 8,3–01
Pu –237	45,3 сут	П М	3,3–10 3,6–10	6,1+07 5,6+07	2,4+04 2,2+04
Pu –238	87,7 лет	П М	4,3–05 1,5–05	8,9+01 ⁽¹⁾ 1,3+03	3,7–02 ⁽¹⁾ 5,3–01
Pu –239	2,41+04 лет	П М	4,7–05 1,5–05	7,8+01 ⁽¹⁾ 1,3+03	3,2–02 ⁽¹⁾ 5,3–01
Pu –240	6,54+03 лет	П М	4,7–05 1,5–05	7,8+01 ⁽¹⁾ 1,3+03	3,2–02 ⁽¹⁾ 5,3–01
Pu –241	14,4 лет	П М	8,5–07 1,6–07	4,1+03 ⁽¹⁾ 1,3+05	1,7 ⁽¹⁾ 5,0+01
Pu –242	3,76+05 лет	П М	4,4–05 1,4–05	7,4+01 ⁽¹⁾ 1,4+03	3,1–02 ⁽¹⁾ 5,7–01

Pu –243	4,95 час	П М	8,2–11 8,5–11	1,6+08 ¹⁾ 2,0+08 ¹⁾	6,8+04 ¹⁾ 8,5+04 ¹⁾
Pu –244	8,26+07 лет	П М	4,4–05 1,3–05	1,5+02 ¹⁾ 1,5+03	6,3–02 ¹⁾ 6,2–01
¹⁾ Сохранены значения ПГПерс и ДОАперс, приведенные в НРБ–76/87, в связи с достигнутым уровнем безопасности на предприятиях России, Эти значения ниже, чем значения, полученные с использованием дозовых коэффициентов из данного приложения.					
Pu–245	10,5 час	П М	4,5–10 4,8–10	4,4+07 4,2+07	1,8+04 1,7+04
Pu–246	10,9 сут	П М	7,0–09 7,6–09	2,9+06 2,6+06	1,1+03 1,1+03
At–237	1,22 час	П	2,5–11	8,0+08	3,2+05
At–238	1,63 час	П	8,5–11	2,4+08	9,4+04
At–239	11,9 час	П	2,2–10	9,1+07	3,6+04
At–240	2,12 сут	П	4,4–10	4,5+07	1,8+04
At–241	4,32+02 лет	П	3,9–05	5,1+02	2,1–01
At–242	16,0 час	П	1,6–08	1,3+06	5,0+02
At–242г	1,52+02 лет	П	3,5–05	5,7+02	2,3–01
At–243	7,38+03 лет	П	3,9–05	5,1+02	2,1–01
At–244	10,1 час	П	1,9–09	1,1+07	4,2+03
At–244 m	0,433 час	П	7,9–11	2,5+08	1,0+05
At–245	2,05 час	П	5,3–11	3,8+08	1,5+05
At–246	0,650 час	П	6,8–11	2,9+08	1,2+05
At–246m	0,417 час	П	2,3–11	8,7+08	3,5+05
Cm–238	2,40 час	П	4,1–09	4,9+06	2,0+03
Cm–240	27,0 сут	П	2,9–06	6,9+03	2,8
Cm–241	32,8 сут	П	3,4–08	5,9+08	2,4+02
Cm–242	163 сут	П	4,8–06	4,2+03	1,7
Cm–243	28,5 лет	П	2,9–05	6,9+02	2,8–01
Cm–244	18,1 лет	П	2,5–05	8,0+02	3,2–01
Cm–245	8,50+03 лет	П	4,0–05	5,0+02	2,0–01
Cm–246	4,73+03 лет	П	4,0–05	5,0+02	2,0–01
Cm–247	1,56+07 лет	П	3,6–05	5,6+02	2,2–01
Cm–248	3,39+05 лет	П	1 4–04	1,4+02	5,7–02
Cm–249	1,07 час	П	3,2–11	6,3+08	2,5+05
C m –250	6,90+03 лет	П	7,9–04	2,5+01	1,0–02
Bk –245	4,94 сут	П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
Bk –246	1,83 сут	П	3,4–10	5,9+07	2,4+04
Bk –247	1,38+03 лет	П	6,5–05	3,1+02	1,2–01
Bk –249	320 сут	П	1,5–07	1,3+05	5,3+01
Bk –250	3,22 час	П	9,6–10	2,1+07	8,3+03
Cf –244	0,323 час	П	1,3–08	1,5+06	6,2+02
Cf –246	1,49 сут	П	4,2–07	4,8+04	1,9+01
Cf –248	334 сут	П	8,2–06	2,4+03	9,8–01
Cf –249	3,50+02 лет	П	6,6–05	3,0+02	1,2–01
Cf –250	13,1 лет	П	3,2–05	6,3+02	2,5–01
Cf –251	8,98+02 лет	П	6,7–05	3,0+02	1,2–01
Cf –252	2,64 лет	П	1,8–05	1,1+03	4,4–01
Cf –253	17,8сут	П	1,2–06	1,7+04	6,7
Cf –254	60,5 сут	П	3,7–05	5,4+02	2,2–01
Es –250	2,10 час	П	5,9–10	3,4+07	1,4+04
Es –251	1,38 сут	П	2,0–09	1,0+07	4,0+03
Es –253	20,5 сут	П	2,5–06	8,0+03	3,2
Es –254	276 сут	П	8,0–06	2,5+03	1,0
Es –254 m	1,64 сут	П	4,4–07	4,5+04	1,8+01
Fm –252	22,7 час	П	3,0–07	6,7+04	2,7+01
Fm –253	3,00 сут	П	3,7–07	5,4+04	2,2+01
Fm –254	3,24 час	П	5,6–08	3,6+05	1,4+02
Fm –255	20,1 час	П	2,5–07	8,0+04	3,2+01

Fm –257	101 сут	П	6,6–06	3,0+03	1,2
Md –257	5,20 час	П	2,3–08	8,7+05	3,5+02
Md –258	55,0 сут	П	5,5–06	3,6+03	1,5

Приложение 7

Значения дозовых коэффициентов, пределов годового поступления с воздухом и пищей, допустимой объемной активности во вдыхаемом воздухе и уровни вмешательства при поступлении с водой отдельных радионуклидов для населения

Радионукл ид	Период полураспа да	Поступление с воздухом				Поступление с водой и пищей					
		Критическ ая группа ^[5]	Дозовый коэффицие нт	Предел годового поступлени я,	Допустимая среднегодов ая объемная активность	Критическ ая группа ^[5]	Дозовы й коэффици циент,	Предел годового поступлени я,	Уровен ь вмеша- тельств а		
РН	T _{1/2}	КГ		$\epsilon_{\text{нас}}^{\text{возд}}$, Зв/Бк	$\text{ПГП}_{\text{нас}}^{\text{возд}}$ Бк в год	ДОА _{нас} , Бк/мЗ	КГ		$\epsilon_{\text{нас}}^{\text{возд}}$, Зв/Бк	$\text{ПГП}_{\text{нас}}^{\text{пищ}}$ Бк в год	УВ ^{вода} Бк/кг
H-3	12,3 лет		#2	2,7–10	3,7+6	1,9+3	^[6]	#2	4,8–11	2,1+7	7,7+3
							^[7]	#2	1,2–10	8,3+6	3,3+3
Be-7	53,3 сут		#4	9,6–11	1,0+7	2,0+3		#2	1,3–10	7,7+6	5,0+3
Be-10	1,60+6 лет		#6	3,5–8	2,9+4	3,5		#2	8,0–9	1,3+5	1,3+2
C-14	5,73+3 лет		#5	2,5–9	4,0+5	5,5+1		#2	1,6–9	6,3+5	2,4+2
Na-22	2,60 лет		#2	7,3–9	1,4+5	7,2+1		#2	1,5–8	6,7+4	4,3+1
^[4] За исключением случаев, отмеченных особо, регламентированные значения относятся ко всем возможным соединениям радионуклидов, поступающим в организм с воздухом, пищей и водой.											
^[5] Обозначение критических групп: #1 – новорожденные дети до 1 года; #2 – дети в возрасте 1–2 года; #3 – дети в возрасте 2–7 лет; #4 – дети в возрасте 7–12 лет; #5 – дети в возрасте 12–17 лет; #6 – взрослые (старше 17 лет).											
^[6] Неорганические соединения трития.											
^[7] Органические соединения трития.											
Al-26	7,16+5 лет		#6	2,0–8	5,0+4	6,2		#2	2,1–8	4,8+4	4,0+1
Si-32	4,50+2 лет		#6	1,1–7	9,1+3	1,1		#2	4,1–9	2,4+5	2,5+2
P-32	14,3 сут		#5	4,0–9	2,5+5	3,4+1		#2	1,9–8	5,3+4	5,8+1
P-33	25,4 сут		#5	1,9–9	5,3+5	7,2+1		#2	1,8–9	5,6+5	5,8+2
S-35	87,4 сут		#5	1,8–9	5,6+5	7,6+1	^[8]	#2	8,7–10	1,1+6	1,1+3
							^[9]	#2	5,4–9	1,9+5	1,8+2
Cl-36	3,01+5 лет		#5	8,8–9	1,1+5	1,6+1		#2	6,3–9	1,6+5	1,5+2
K-40 ^[10]	1,28+9 лет		#2	1,7–8	5,9+4	3,1+1		#2	4,2–8	2,4+4	2,2+1
Ca-41	1,40+5 лет		#5	3,3–10	3,0+6	4,2+2		#5	5,0–10	2,0+6	7,3+2
Ca-45	163 сут		#5	4,6–9	2,2+5	3,0+1		#2	4,9–9	2,0+5	2,0+2
Ca-47	4,53 сут		#5	2,6–9	3,8+5	5,3+1		#2	9,3–9	1,1+5	8,7+1
Sc-44 m	2,44 сут		#2	8,4–9	1,2+5	6,3+1		#2	1,6–8	6,3+4	5,8+1
Sc-46	83,8 сут		#5	8,4–9	1,2+5	1,6+1		#2	7,9–9	1,3+5	9,3+1
Sc-47	3,35 сут		#5	9,2–10	1,1+6	1,5+2		#2	3,9–9	2,6+5	2,6+2
Sc-48	1,82 сут		#2	5,9–9	1,7+5	8,9+1		#2	9,3–9	1,1+5	8,2+1
Ti-44	47,3 лет		#6	1,2–7	8,3+3	1,0		#2	3,1–8	3,2+4	2,4+1
V-48	16,2 суг		#4	4,3–9	2,3+5	4,5+1		#2	1,1–8	9,1+4	6,9+1
V-49	330 сут		#2	2,1–10	4,8+6	2,5+3		#2	1,4–10	7,1+6	7,7+3
Cr-51	27,7 сут		#2	2,1–10	4,8+6	2,5+3		#2	2,3–10	4,3+6	3,7+3
^[8] Неорганические соединения серы.											
^[9] Органические соединения серы.											
^[10] При поступлении изотопа ⁴⁰ K дополнительно к природной смеси изотопов калия.											
Mn-52	5,59 сут		#2	6,8–9	1,5+5	7,7+1		#2	8,8–9	1,1+5	7,7+1
Mn-53	3,70+6 лет		#2	3,4–10	2,9+6	1,5+3		#2	2,2–10	4,5+6	4,6+3
Mn-54	312 сут		#5	1,9–9	5,3+5	7,2+1		#2	3,1–9	3,2+5	2,0+2
Fe-55	2,70 лет		#4	6,2–10	1,6+6	3,1+2		#2	2,4–9	4,2+5	4,2+2
Fe-59	44,5 сут		#5	4,6–9	2,2+5	3,0+1		#2	1,3–8	7,7+4	7,7+1
Fe-60	1,00+5 лет		#6	1,4–7	7,1+3	8,8–1		#5	2,3–7	4,3+3	1,3
Co-56	78,7 сут		#5	5,8–9	1,7+5	2,4+1		#2	1,5–8	6,7+4	5,6+1
Co-57	271 сут		#5	6,7–10	1,5+6	2,0+2		#2	1,6–9	6,3+5	6,6+2

Co-58	70,8 сут		#5	2,0-9	5,0+5	6,8+1		#2	4,4-9	2,3+5	1,9+2
Co-60	5,27 лет		#5	1,2-8	8,3+4	1,1+1		#2	2,7-8	3,7+4	4,1+1
Ni-56	6,10 сут		#5	1,1-9	9,1+5	1,2+2		#2	4,0-9	2,5+5	1,6+2
Ni-57	1,50 сут		#2	2,8-9	3,6+5	1,9+2		#2	4,9-9	2,0+5	1,6+2
Ni-59	7,50+4 лет		#2	6,2-10	1,6+6	8,5+2		#2	3,4-10	2,9+6	2,2+3
Ni-63	96,0 лет		#6	4,8-10	2,1+6	2,6+2		#2	8,4-10	1,2+6	9,3+2
Ni-66	2,27 сут		#2	9,4-9	1,1+5	5,6+1		#2	2,2-8	4,5+4	4,6+1
Cu-67	2,58 сут		#5	7,7-10	1,3+6	1,8+2		#2	2,4-9	4,2+5	4,1+2
Zn-65	244 сут		#5	1,9-9	5,3+5	7,2+1		#2	1,6-8	6,3+4	3,6+1
Zn-72	1,94 сут		#2	6,5-9	1,5+5	8,1+1		#2	8,6-9	1,2+5	9,9+1
Ga-67	3,26 сут		#5	3,0-10	3,3+6	4,6+2		#2	1,2-9	8,3+5	7,3+2
Ge-68	288 сут		#5	1,6-8	6,3+4	8,6		#2	8,0-9	1,3+5	1,1+2
Ge-69	1,63 сут		#2	1,4-9	7,1+5	3,8+2		#2	1,3-9	7,7+5	5,8+2
Ge-71	11,8 сут		#2	8,6-11	1,2+7	6,1+3		#2	7,8-11	1,3+7	1,2+4
As-71	2,70 сут		#5	5,0-10	20+6	2,7+2		#2	2,8-9	3,6+5	3,0+2
As-72	1,08сут		#2	5,7-9	1,8+5	9,2+1		#2	1,2-8	8,3+4	7,7+1
As-73	80,3 сут		#5	1,2-9	8,3+5	1,1+2		#2	1,9-9	5,3+5	5,3+2
As-74	17,8 сут		#5	2,6-9	3,8+5	5,3+1		#2	8,2-9	1,2+5	1,1+2
As-76	1,10 сут		#2	4,6-9	2,2+5	1,1+2		#2	1,1-8	9,1+4	8,7+1
As-77	1,62 сут		#5	5,0-10	2,0+6	2,7+2		#2	2,9-9	3,4+5	3,5+2
Se-75	120 сут		#4	2,5-9	4,0+5	7,7+1		#2	1,3-8	7,7+4	5,3+1
Se-79	6,50+4 лет		#4	5,6-9	1,8+5	3,4+1		#2	2,8-8	3,6+4	4,8+1
Br-77	2,33 сут		#2	5,1-10	2,0+6	1,0+3		#2	4,4-10	2,3+6	1,4+3
Br-82	1,47 сут		#5	7,9-10	1,3+6	1,7+2		#2	2,6-9	3,8+5	2,6+2
Rb-83	86,2 сут		#2	3,8-9	2,6+5	1,4+2		#2	8,4-9	1,2+5	7,3+1
Rb-84	32,8 сут		#2	6,4-9	1,6+5	8,2+1		#2	1,4-8	7,1+4	5,0+1
Rb-86	18,7 сут		#2	7,7-9	1,3+5	6,8+1		#2	2,0-8	5,0+4	5,0+1
Sr-82	25,0 сут		#2	4,0-8	2,5+4	1,3+1		#2	4,1-8	2,4+4	2,3+1
Sr-83	1,35 сут		#2	1,9-9	5,3+5	2,8+2		#2	2,7-9	3,7+5	2,8+2
Sr-85	64,8 сут		#5	8,8-10	1,1+6	1,6+2		#2	3,1-9	3,2+5	2,5+2
Sr-89	50,5 сут		#5	7,3-9	1,4+5	1,9+1		#2	1,8-8	5,6+4	5,3+1
Sr-90	29,1 лет		#5	5,0-8	2,0+4	2,7		#5	8,0-8	1,3+4	5,0
Y-87	3,35 сут		#2	2,2-9	4,5+5	2,4+2		#2	3,2-9	3,1+5	2,5+2
Y-88	107 сут		#5	5,4-9	1,9+5	2,5+1		#2	6,0-9	1,7+5	1,1+2
Y-90	2,67 сут		#2	8,8-9	1,1+5	6,0+1		#2	2,0-8	5,0+4	5,1+1
Y-91	58,5 сут		#5	1,0-8	1,0+5	1,4+1		#2	1,8-8	5,6+4	5,8+1
Zr-88	83,4 сут		#5	3,0-9	3,3+5	4,6+1		#2	2,0-9	5,0+5	3,1+2
Zr-89	3,27 сут		#2	2,8-9	3,6+5	1,9+2		#2	4,5-9	2,2+5	1,8+2
Zr-93	1,53+6лет		#6	1,0-8	1,0+5	1,2+1		#6	1,1-9	9,1+5	1,3+2
Zr-95	64,0 сут		#5	5,9-9	1,7+5	2,3+1		#2	5,6-9	1,8+5	1,5+2
Nb-93 m	13,6 лет		#2	2,4-9	4,2+5	2,2+2		#2	9,1-10	1,1+6	1,2+3
Nb-94	2,03+4 лет		#5	1,3-8	7,7+4	1,1+1		#2	9,7-9	1,0+5	8,2+1
Nb-95	35,1 сут		#5	1,9-9	5,3+5	7,2+1		#2	3,2-9	3,1+5	2,4+2
Nb-95 m	3,61 сут		#5	1,0-9	1,0+6	1,4+2		#2	4,1-9	2,4+5	2,5+2
Mo-93	3,50+3 лет		#5	6,6-10	1,5+6	2,1+2		#2	6,9-9	1,4+5	4,5+1
Mo-99	2,75 сут		#2	4,4-9	2,3+5	1,2+2		#2	3,5-9	2,9+5	2,3+2
Tc-95m	61,0 сут		#5	1,1-9	9,1+5	1,2+2		#2	2,8-9	3,6+5	2,5+2
Tc-96	4,28 сут		#2	3,9-9	2,6+5	1,3+2		#2	5,1-9	2,0+5	1,3+2
Tc-97	2,60+6 лет		#5	2,8-10	3,6+6	4,9+2		#2	4,9-10	2,0+6	2,0+3
Tc-97 m	87,0 сут		#5	4,1-9	2,4+5	3,3+1		#2	4,1-9	2,4+5	2,5+2
Tc-98	4,20+6 лет		#5	1,0-8	1,0+5	1,4+1		#2	1,2-8	8,3+4	6,9+1
Tc-99	2,13+5 лет		#5	5,0-9	2,0+5	2,7+1		#2	4,8-9	2,1+5	2,2+2
Ru-97	2,90 сут		#2	6,1-10	1,6+6	8,6+2		#2	8,5-10	1,2+6	9,3+2
Ru-103	39,3 сут		#5	3,0-9	3,3+5	4,6+1		#2	4,6-9	2,2+5	1,9+2
Ru-106	1,01 лет		#6	2,8-8	3,6+4	4,4		#2	4,9-8	2,0+4	2,0+1
Rh-99	16,0 сут		#5	1,1-9	9,1+5	1,2+2		#2	2,9-9	3,4+5	2,7+2
Rh-101	3,20 лет		#5	6,2-9	1,6+5	2,2+1		#2	2,8-9	3,6+5	2,5+2
Rh-101 m	4,34 сут		#5	2,7-10	3,7+6	5,1+2		#2	1,2-9	8,3+5	6,3+2

Rh-102	2,90 лет		#5	2,0-8	5,0+4	6,8		#2	1,0-8	1,0+5	5,3+1
Rh -102 m	207 сут		#5	8,2-9	1,2+5	1,7+1		#2	7,4-9	1,4+5	1,2+2
Rh -105	1,47 сут		#5	4,5-10	2,2+6	3,0+2		#2	2,7-9	3,7+5	3,8+2
Pd-100	3,63 сут		#4	1,5-9	6,7+5	1,3+2		#2	5,2-9	1,9+5	1,5+2
Pd-103	17,0 сут		#5	5,3-10	1,9+6	2,6+2		#2	1,4-9	7,1+5	7,3+2
Pd -107	6,50+6 лет		#6	5,9-10	1,7+6	2,1+2		#2	2,8-10	3,6+6	3,8+3
Ag -105	41,0 сут		#4	1,3-9	7,7+5	1,5+2		#2	2,5-9	4,0+5	3,0+2
Ag -106 m	8,41 сут		#2	5,8-9	1,7+5	9,1+1		#2	6,9-9	1,4+5	9,3+1
Ag -108 m	1,27+2 лет		#5	8,6-9	1,2+5	1,6+1		#2	1,1-8	9,1+4	6,0+1
Ag-110m	250 сут		#5	9,2-9	1,1+5	1,5+1		#2	1,4-8	7,1+4	5,0+1
Ag -111	7,45 сут		#5	1,9-9	5,3+5	7,2+1		#2	9,3-9	1,1+5	1,1+2
Cd -109	1,27 лет		#4	1,4-8	7,1+4	1,4+1		#2	9,5-9	1,1+5	6,9+1
Cd -113 m	13,6 лет		#6	1,1-7	9,1+3	1,1		#2	5,6-8	1,8+4	6,0
Cd -115	2,23 сут		#2	5,1-9	2,0+5	1,0+2		#2	9,7-9	1,0+5	9,9+1
Cd -115 m	44,6 сут		#5	8,9-9	1,1+5	1,5+1		#2	1,9-8	5,3+4	4,2+1
In-111	2,83 сут		#2	1,2-9	8,3+5	4,4+2		#2	1,7-9	5,9+5	4,8+2
In-114m	49,5 сут		#2	7,7-8	1,3+4	6,8		#2	3,1-8	3,2+4	3,4+1
Sn -113	115 сут		#5	3,2-9	3,1+5	4,3+1		#2	5,0-9	2,0+5	1,9+2
Sn -117 m	13,6 сут		#5	3,1-9	3,2+5	4,4+1		#2	5,0-9	2,0+5	2,0+2
Sn -119 m	293 сут		#5	2,6-9	3,8+5	5,3+1		#2	2,5-9	4,0+5	4,1+2
Sn -121	1,13 сут		#5	2,9-10	3,4+6	4,7+2		#2	1,7-9	5,9+5	6,0+2
Sn -121 m	55,0 лет		#5	5,5-9	1,8+5	2,5+1		#2	2,7-9	3,7+5	3,7+2
Sn -123	129 сут		#5	9,5-9	1,1+5	1,4+1		#2	1,6-8	6,3+4	6,6+1
Sn -125	9,64 сут		#2	1,5-8	6,7+4	3,5+1		#2	2,2-8	4,5+4	4,5+1
Sn -126	1,00+5 лет		#5	3,3-8	3,0+4	4,2		#2	3,0-8	3,3+4	3,0+1
Sb -119	1,59 сут		#2	2,8-10	3,6+6	1,9+3		#2	5,8-10	1,7+6	1,7+3
Sb -120	5,76 сут		#2	5,0-9	2,0+5	1,1+2		#2	6,0-9	1,7+5	1,2+2
Sb-122	2,70 сут		#2	5,7-9	1,8+5	9,2+1		#2	1,2-8	8,3+4	8,2+1
Sb-124	60,2 сут		#5	7,7-9	1,3+5	1,8+1		#2	1,6-8	6,3+4	5,6+1
Sb -125	2,77 лет		#5	5,8-9	1,7+5	2,4+1		#2	6,1-9	1,6+5	1,3+2
Sb-126	12,4 сут		#4	5,1-9	2,0+5	3,8+1		#2	1,4-8	7,1+4	5,8+1
Sb-127	3,85 сут		#5	2,1-9	4,8+5	6,5+1		#2	1,2-8	8,3+4	8,2+1
Te-121	17,0 сут		#2	1,9-9	5,3+5	2,8+2		#2	2,0-9	5,0+5	3,2+2
Te -121 m	154 сут		#5	5,1-9	2,0+5	2,7+1		#2	1,2-8	8,3+4	6,0+1
Te-123 m	120 сут		#5	5,0-9	2,0+5	2,7+1		#2	8,8-9	1,1+5	9,9+ 1
Te -125 m	58,0 сут		#5	4,3-9	2,3+5	3,2+1		#2	6,3-9	1,6+5	1,6+2
Te -127 m	109 сут		#5	9,2-9	1,1+5	1,5+1		#2	1,8-8	5,6+4	6,0+1
Te-129m	33,6 сут		#5	8,0-9	1,3+5	1,7+1		#2	2,4-8	4,2+4	4,6+1
Te -131 m	1,25 сут		#2	5,8-9	1,7+5	9,1+1		#2	1,4-8	7,1+4	7,3+1
Te-132	3,26 сут		#2	1,3-8	7,7+4	4,0+1		#2	3,0-8	3,3+4	3,7+1
I-124	4,18 сут		#2	4,5-8	2,2+4	1,2+1		#2	1,1-7	9,1+3	1,1+1
I-125	60,1 сут		#4	1,1-8	9,1+4	1,7+1		#2	5,7-8	1,8+4	9,3
I-126	13,0 сут		#2	8,3-8	1,2+4	6,3		#2	2,1-7	4,8+3	4,8
I-129	1,57+7 лет		#4	6,7-8	1,5+4	2,9		#4	1,9-7	5,3+3	1,3
I-131	8,04 сут		#2	7,2-8	1,4+4	7,3		#2	1,8-7	5,6+3	6,3
Cs -129	1,34 сут		#2	2,8-10	3,6+6	1,9+3		#2	3,0-10	3,3+6	2,3+3
Cs -131	9,69 сут		#2	1,7-10	5,9+6	3,1+3		#2	2,9-10	3,4+6	2,4+3
Cs -132	6,48 сут		#2	1,2-9	8,3+5	4,4+2		#2	1,8-9	5,6+5	2,8+2
Cs -134	2,06 лет		#6	6,6-9	1,5+5	1,9+1		#6	1,9-8	5,3+4	7,3
Cs -135	2,30+6 лет		#6	6,9-10	1,4+6	1,8+2		#6	2,0-9	5,0+5	6,9+1
Cs -136	13,1 сут		#4	2,0-9	5,0+5	9,6+1		#2	9,5-9	1,1+5	4,6+1
Cs -137	30,0 лет		#6	4,6-9	2,2+5	2,7+1		#6	1,3-8	7,7+4	1,1+1
Ba-128	2,43 сут		#2	7,8-9	1,3+5	6,7+1		#2	1,7-8	5,9+4	5,1+1
Ba-131	11,8сут		#5	9,7-10	1,0+6	1,4+2		#2	2,6-9	3,8+5	3,1+2
Ba-133	10,7 лет		#5	5,5-9	1,8+5	2,5+1		#5	7,3-9	1,4+5	9,3+1
Ba-133 m	1,62 сут		#2	2,2-9	4,5+5	2,4+2		#2	3,6-9	2,8+5	2,6+2
Ba-135m	1,20 сут		#2	1,8-9	5,6+5	2,9+2		#2	2,9-9	3,4+5	3,2+2
Ba-140	12,7 сут		#5	6,2-9	1,6+5	2,2+1		#2	1,8-8	5,6+4	5,3+1

La –137	6,00+4 лет		#6	8,7–9	1,1+5	1,4+1		#2	4,5–10	2,2+6	1,7+3
La –140	1,68 сут		#2	6,3–9	1,6+5	8,4+1		#2	1,3–8	7,7+4	6,9+1
Ce–134	3,00 сут		#2	7,6–9	1,3+5	6,9+1		#2	1,8–8	5,6+4	5,6+1
Ce–137m	1,43 сут		#2	2,2–9	4,5+5	2,4+2		#2	3,9–9	2,6+5	2,6+2
Ce–139	138 сут		#5	2,1–9	4,8+5	6,5+1		#2	1,6–9	6,3+5	5,3+2
Ce–141	32,5 сут		#5	4,1–9	2,4+5	3,3+1		#2	5,1–9	2,0+5	2,0+2
Ce–143	1,38 сут		#2	3,9–9	2,6+5	1,3+2		#2	8,0–9	1,3+5	1,3+2
Ce–144	284 сут		#2	1,6–7	6,3+3	3,3		#2	3,9–8	2,6+4	2,7+1
Pr–143	13,6 сут		#5	3,0–9	3,3+5	4,6+1		#2	8,7–9	1,1+5	1,2+2
Nd –147	11,0 сут		#5	3,0–9	3,3+5	4,6+1		#2	7,8–9	1,3+5	1,3+2
Pm–143	265 сут		#5	1,7–9	5,9+5	8,1+1		#2	1,2–9	8,3+5	6,0+2
Pm–144	363 сут		#5	9,3–9	1,1+5	1,5+1		#2	4,7–9	2,1+5	1,4+2
Pm–145	17,7 лет		#6	3,6–9	2,8+5	3,4+1		#2	6,8–10	1,5+6	1,3+3
Pm–146	5,53 лет		#6	2,1–8	4,8+4	5,9		#2	5,1–9	2,0+5	1,5+2
Pm –147	2,62 лет		#5	5,8–9	1,7+5	2,4+1		#2	1,9–9	5,3+5	5,3+2
Pm–148	5,37 сут		#2	1,1–8	9,1+4	4,8+1		#2	1,9–8	5,3+4	5,1+1
Pm –148 m	41,3 сут		#5	7,1–9	1,4+5	1,9+1		#2	1,0–8	1,0+5	8,2+1
Pm –149	2,21 сут		#2	3,6–9	2,8+5	1,5+2		#2	7,4–9	1,4+5	1,4+2
Pm–151	1,18 сут		#2	2,6–9	3,8+5	2,0+2		#2	5,1–9	2,0+5	1,9+2
Sm–145	340 сут		#5	1,9–9	5,3+5	7,2+1		#2	1,4–9	7,1+5	6,6+2
Sm –146	1,03+8 лет		#6	1,1–5	9,1+1	1,1–2		#2	1,5–7	6,7+3	2,6
Sm –151	90,0 лет		#6	4,0–9	2,5+5	3,1+1		#2	6,4–10	1,6+6	1,4+3
Sm –153	1,95 сут		#5	7,9–10	1,3+6	1,7+2		#2	5,4–9	1,9+5	1,9+2
Eu –145	5,94 сут		#2	2,9–9	3,4+5	1,8+2		#2	3,7–9	2,7+5	1,9+2
Eu –146	4,61 сут		#2	4,4–9	2,3+5	1,2+2		#2	6,2–9	1,6+5	1,1+2
Eu –147	24,0 сут		#5	1,3–9	7,7+5	1,1+2		#2	2,5–9	4,0+5	3,2+2
Eu –148	54,5 сут		#4	4,6–9	2,2+5	4,2+1		#2	6,0–9	1,7+5	1,1+2
Eu –149	93,1 сут		#5	3,5–10	2,9+6	3,9+2		#2	6,3–10	1,6+6	1,4+3
Eu –150	34,2 лет		#6	5,3–8	1,9+4	2,3		#2	5,7–9	1,8+5	1,1+2
Eu –152	13,3 лет		#6	4,2–8	2,4+4	2,9		#2	7,4–9	1,4+5	9,9+1
Eu –154	8,80 лет		#6	5,3–8	1,9+4	2,3		#2	1,2–8	8,3+4	6,9+1
Eu –155	4,96 лет		#6	6,9–9	1,4+5	1,8+1		#2	2,2–9	4,5+5	4,3+2
Eu –156	15,2 сут		#5	4,2–9	2,4+5	3,3+1		#2	1,5–8	6,7+4	6,3+1
Gd –146	48,3 сут		#5	7,9–9	1,3+5	1,7+1		#2	6,0–9	1,7+5	1,4+2
Gd–147	1,59 сут		#2	2,2–9	4,5+5	2,4+2		#2	3,2–9	3,1+5	2,3+2
Gd–148	93,0 лет		#6	2,6–5	3,8+1	4,7–3		#2	1,6–7	6,3+3	2,5
Gd –149	9,40 сут		#5	9,2–10	1,1+6	1,5+2		#2	2,7–9	3,7+5	3,1+2
Gd–151	120 сут		#2	4,9–9	2,0+5	1,1+2		#2	1,3–9	7,7+5	6,9+2
Gd–153	242 сут		#2	1,2–8	8,3+4	4,4+1		#2	1,8–9	5,6+5	5,1+2
Tb –153	2,34 сут		#2	1,0–9	1,0+6	5,3+2		#2	1,5–9	6,7+5	5,6+2
Tb–155	5,32 сут		#5	2,7–10	3,7+6	5,1+2		#2	1,3–9	7,7+5	6,6+2
Tb–156	5,34 сут		#5	1,5–9	6,7+5	9,1+1		#2	6,3–9	1,6+5	1,2+2
Tb –156 m	1,02 сут		#5	2,7–10	3,7+6	5,1+2		#2	1,0–9	1,0+6	8,2+2
Tb –157	1,50+2 лет		#6	1,2–9	8,3+5	1,0+2		#2	2,2–10	4,5+6	4,1+3
Tb –158	1,50+2 лет		#6	4,6–8	2,2+4	2,7		#2	5,9–9	1,7+5	1,3+2
Tb –160	72,3 сут		#5	8,6–9	1,2+5	1,6+1		#2	1,0–8	1,0+5	8,7+1
Tb –161	6,91 сут		#5	1,6–9	6,3+5	8,6+1		#2	5,3–9	1,9+5	1,9+2
Dy –159	144 сут		#2	1,7–9	5,9+5	3,1+2		#2	6,4–10	1,6+6	1,4+3
Dy –166	3,40 сут		#5	2,3–9	4,3+5	6,0+1		#2	1,2–8	8,3+4	8,7+1
Ho –166	1,12 сут		#2	4,0–9	2,5+5	1,3+2		#2	1,0–8	1,0+5	9,9+1
Ho–166 m	1,20+3 лет		#6	1,2–7	8,3+3	1,0		#2	9,3–9	1,1+5	6,9+1
Er –169	9,30 сут		#5	1,3–9	7,7+5	1,1+2		#2	2,8–9	3,6+5	3,8+2
Er–172	2,05 сут		#5	1,4–9	7,1+5	9,8+1		#2	6,8–9	1,5+5	1,4+2
Tm–167	9,24 сут		#5	1,4–9	7,1+5	9,8+1		#2	3,9–9	2,6+5	2,5+2
Tm –170	129 сут		#5	8,5–9	1,2+5	1,6+1		#2	9,8–9	1,0+5	1,1+2
Tm –171	1,92 лет		#5	1,6–9	6,3+5	8,6+1		#2	7,8–10	1,3+6	1,3+3
Tm –172	2,65 сут		#2	5,8–9	1,7+5	9,1+1		#2	1,2–8	8,3+4	8,2+1
Yb –166	2,36 сут		#2	3,7–9	2,7+5	1,4+2		#2	5,4–9	1,9+5	1,5+2

Yb-169	32,0 сут		#5	3,7-9	2,7+5	3,7+1		#2	4,6-9	2,2+5	2,0+2
Yb-175	4,19 сут		#5	9,2-10	1,1+6	1,5+2		#2	3,2-9	3,1+5	3,2+2
Lu -169	1,42 сут		#2	1,9-9	5,3+5	2,8+2		#2	2,4-9	4,2+5	3,0+2
Lu -170	2,00 сут		#2	3,5-9	2,9+5	1,5+2		#2	5,2-9	1,9+5	1,4+2
Lu -171	8,22 сут		#5	1,1-9	9,1+5	1,2+2		#2	4,0-9	2,5+5	2,1+2
Lu -172	6,70 сут		#5	2,0-9	5,0+5	6,8+1		#2	7,0-9	1,4+5	1,1+2
Lu -173	1,37 лет		#5	2,9-9	3,4+5	4,7+1		#2	1,6-9	6,3+5	5,3+2
Lu -174	3,31 лет		#5	4,9-9	2,0+5	2,8+1		#2	1,7-9	5,9+5	5,1+2
Lu -174 m	142 сут		#5	5,0-9	2,0+5	2,7+1		#2	3,8-9	2,6+5	2,6+2
Lu -177	6,71 сут		#5	1,5-9	6,7+5	9,1+1		#2	3,9-9	2,6+5	2,6+2
Lu -177 m	161 сут		#5	2,0-8	5,0+4	6,8		#2	1,1-8	9,1+4	8,2+1
Hf -172	1,87 лет		#6	3,2-8	3,1+4	3,9		#2	6,1-9	1,6+5	1,4+2
Hf -175	70,0-сут		#5	1,4-9	7,1+5	9,8+1		#2	2,4-9	4,2+5	3,4+2
Hf -178 m	31,0 лет		#6	2,6-7	3,8+3	4,7-1		#2	1,9-8	5,3+4	3,0+1
Hf -179 m	25,1 сут		#5	4,8-9	2,1+5	2,9+1		#2	7,8-9	1,3+5	1,2+2
Hf -181	42,4 сут		#5	6,3-9	1,6+5	2,2+1		#2	7,4-9	1,4+5	1,3+2
Hf -182	9,00+6 лет		#6	3,1-7	3,2+3	4,0-1		#2	7,9-9	1,3+5	4,6+1
Ta-177	2,36 сут		#2	5,0-10	2,0+6	1,1+3		#2	6,9-10	1,4+6	1,3+3
Ta-179	1,82 лет		#5	6,4-10	1,6+6	2,1+2		#2	4,1-10	2,4+6	2,1+3
Ta-182	115 сут		#5	1,3-8	7,7+4	1,1+1		#2	9,4-9	1,1+5	9,3+1
Ta-183	5,10 сут		#5	2,7-9	3,7+5	5,1+1		#2	9,3-9	1,1+5	1,1+2
W -178	21,7 сут		#2	5,4-10	1,9+6	9,7+2		#2	1,4-9	7,1+5	6,3+2
W -181	121 сут		#2	1,9-10	5,3+6	2,8+3		#2	4,7-10	2,1+6	1,8+3
W -185	75,1 сут		#2	1,0-9	1,0+6	5,3+2		#2	3,3-9	3,0+5	3,2+2
W -188	69,4 сут		#2	5,0-9	2,0+5	1,1+2		#2	1,5-8	6,7+4	6,6+1
Re-182	2,67 сут		#2	6,3-9	1,6+5	8,4+1		#2	8,9-9	1,1+5	9,9+1
Re-184	38,0 сут		#5	2,4-9	4,2+5	5,7+1		#2	5,6-9	1,8+5	1,4+2
Re -184 m	165 сут		#5	8,1-9	1,2+5	1,7+1		#2	9,8-9	1,0+5	9,3+1
Re -186	3,78 сут		#2	5,7-9	1,8+5	9,2+1		#2	1,1-8	9,1+4	9,3+1
Re -186 m	2,00+5 лет		#5	1,4-8	7,1+4	9,8		#2	1,6-8	6,3+4	6,3+1
Re-189	1,01 сут		#2	2,6-9	3,8+5	2,0+2		#2	6,2-9	1,6+5	1,8+2
Os-185	94,0 сут		#5	1,9-9	5,3+5	7,2+1		#2	2,6-9	3,8+5	2,7+2
Os -191	15,4 сут		#5	2,3-9	4,3+5	6,0+1		#2	4,1-9	2,4+5	2,4+2
Os-193	1,25 сут		#2	2,7-9	3,7+5	1,9+2		#2	6,0-9	1,7+5	1,7+2
Os-194	6,00 лет		#6	8,5-8	1,2+4	1,5		#2	1,7-8	5,9+4	5,8+1
Ir -188	1,73 сут		#2	2,2-9	4,5+5	2,4+2		#2	3,3-9	3,0+5	2,2+2
Ir-189	13,3 сут		#5	7,3-10	1,4+6	1,9+2		#2	1,7-9	5,9+5	5,8+2
Ir-190	12,1 сут		#5	3,0-9	3,3+5	4,6+1		#2	7,1-9	1,4+5	1,2+2
Ir -192	74,0 сут		#5	8,1-9	1,2+5	1,7+1		#2	8,7-9	1,1+5	9,9+1
Ir -192 m	2,41+2 лет		#6	3,9-8	2,6+4	3,2		#2	1,4-9	7,1+5	4,5+2
Ir -193 m	11,9 сут		#5	1,6-9	6,3+5	8,6+1		#2	2,0-9	5,0+5	5,1+2
Ir -194 m	171 сут		#5	1,5-8	6,7+4	9,1		#2	1,1-8	9,1+4	6,6+1
Pt -188	10,2 сут		#2	2,7-9	3,7+5	1,9+2		#2	4,5-9	2,2+5	1,8+2
Pt -191	2,80 сут		#2	7,9-10	1,3+6	6,7+2		#2	2,1-9	4,8+5	4,1+2
Pt -193	50,0 лет		#2	1,6-10	6,3+6	3,3+3		#2	2,4-10	4,2+6	4,5+3
Pt -193 m	4,33 сут		#2	1,0-9	1,0+6	5,3+2		#2	3,4-9	2,9+5	3,1+2
Pt -195 m	4,02 сут		#2	1,5-9	6,7+5	3,5+2		#2	4,6-9	2,2+5	2,2+2
Au-194	1,65 сут		#2	1,4-9	7,1+5	3,8+2		#2	2,2-9	4,5+5	3,3+2
Au-195	183 сут		#5	2,1-9	4,8+5	6,5+1		#2	1,7-9	5,9+5	5,6+2
Au -198	2,69 сут		#2	4,4-9	2,3+5	1,2+2		#2	7,2-9	1,4+5	1,4+2
Au -198 m	2,30 сут		#5	2,5-9	4,0+5	5,5+1		#2	8,5-9	1,2+5	1,1+2
Au -199	3,14 сут		#5	1,0-9	1,0+6	1,4+2		#2	3,1-9	3,2+5	3,2+2
Hg -194	2,60+2 лет	^[11]	#6	1,4-8	7,1+4	8,8		#2	1,2-7	8,3+3	2,7
		^[12]	#6	1,3-8	7,7+4	9,5		#2	3,6-9	2,8+5	9,9+1
Hg -195 m	1,73 сут	^[11]	#2	9,7-10	1,0+6	5,4+2		#2	2,8-9	3,6+5	3,4+2
		^[12]	#2	2,6-9	3,8+5	2,0+2		#2	3,8-9	2,6+5	2,5+2
Hg -197	2,67 сут	^[11]	#2	4,0-10	2,5+6	1,3+3		#2	1,2-9	8,3+5	8,2+2
		^[12]	#5	3,8-10	2,6+6	3,6+2		#2	1,6-9	6,3+5	6,0+2

Hg –203	46,6 сут	^[11]	#2	3,7–9	2,7+5	1,4+2		#2	1,1–8	9,1+4	7,3+1
		^[12]	#5	3,0–9	3,3+5	4,6+1		#2	3,6–9	2,8+5	2,6+2
Tl –200	1,09 сут		#2	8,7–10	1,1+6	6,0+2		#2	9,1–10	1,1+6	6,9+2
Tl –201	3,04 сут		#2	3,3–10	3,0+6	1,6+3		#2	5,5–10	1,8+6	1,5+3
Tl –202	12,2 сут		#2	1,2–9	8,3+5	4,4+2		#2	2,1–9	4,8+5	3,1+2
Tl –204	3,78 лет		#2	3,3–9	3,0+5	1,6+2		#2	8,5–9	1,2+5	1,2+2
Pb –202	3,00+5 лет		#5	8,7–9	1,1+5	1,6+1		#5	2,7–8	3,7+4	1,6+1
Pb –203	2,17 сут		#2	1,0–9	1,0+6	5,3+2		#2	1,3–9	7,7+5	5,8+2
^[11] Органические соединения ртути											
^[12] Неорганические соединения ртути.											
Pb–205	1,43+7 лет		#5	2,9–10	3,4+6	4,7+2		#2	9,9–10	1,0+6	5,0+2
Pb–210	22,3 лет		#5	1,3–6	7,7+2	1,1–1		#2	3,6–6	2,8+2	2,0–1
Bi –205	15,3 суг		#5	1,2–9	8,3+5	1,1+2		#2	4,5–9	2,2+5	1,5+2
Bi–206	6,24 сут		#5	2,1–9	4,8+5	6,5+1		#2	1,0–8	1,0+5	7,3+1
Bi –207	38,0 лет		#5	6,5–9	1,5+5	2,1+1		#2	7,1–9	1,4+5	1,1+2
Bi –210	5,01 суг		#5	1,1–7	9,1+3	1,2		#2	9,7–9	1,0+5	1,1+2
Bi–210m	3,00+6 лет		#5	4,1–6	2,4+2	3,3–2		#2	9,1–8	1,1+4	9,3
Po –210	138 сут		#5	4,0–6	2,5+2	3,4–2		#2	8,8–6	1,1+2	1,2–1
Ra–223	11,4 сут		#5	9,4–6	1,1+2	1,5–2		#2	1,1–6	9,1+2	1,4
Ra–224	3,66 сут		#5	3,7–6	2,7+2	3,7–2		#2	6,6–7	1,5+3	2,1
Ra –225	14,8 сут		#5	7,9–6	1,3+2	1,7–2		#2	1,2–6	8,3+2	1,4
Ra –226	1,60+3 лет		#5	4,5–6	2,2+2	3,0–2		#5	1,5–6	6,7+2	5,0–1
Ra –228	5,75 лет		#5	4,4–6	2,3+2	3,1–2		#5	5,3–6	1,9+2	2,0–1
Ac –225	10,0 сут		#5	1,1–5	9,1+1	1,2–2		#2	1,8–7	5,6+3	5,8
Ac–226	1,21 сут		#5	1,6–6	6,3+2	8,6–2		#2	7,6–8	1,3+4	1,4+1
Ac–227	21,8 лет		#6	5,5–4	1,8	2,2–4		#2	3,1–6	3,2+2	1,3–1
Th –227	18,7 сут		#5	1,3–5	7,7+1	1,1–2		#2	7,0–8	1,4+4	1,6+1
Th–228	1,91 лет		#5	4,7–5	2,1+1	2,9–3		#2	3,7–7	2,7+3	1,9
Th–229	7,34+3 лет		#6	7,1–5	1,4+1	1,7–3		#2	1,0–6	1,0+3	2,8–1
Th –230	7,70+4 лет		#6	1,4–5	7,1+1	8,8–3		#2	4,1–7	2,4+3	6,6–1
Th–231	1,06 сут		#2	1,7–9	5,9+5	3,1+2		#2	2,5–9	4,0+5	4,1+2
Th–232	1,40+1		#6	2,5–5	4,0+1	4,9–3		#2	4,5–7	2,2+3	6,0–1
Th–234	24,1 сут		#5	9,1–9	1,1+5	1,5+1		#2	2,5–8	4,0+4	4,1+1
Pa –230	17,4 суг		#5	9,6–7	1,0+3	1,4–1		#2	5,7–9	1,8+5	1,5+2
Pa–231	3,27+4 лет		#6	1,4–4	7,1	8,8–4		#2	1,3–6	7,7+2	2,0–1
Pa–232	1,31 суг		#6	1,0–8	1,0+5	1,2+1		#2	4,2–9	2,4+5	1,9+2
Pa –233	27,0 суг		#5	4,9–9	2,0+5	2,8+1		#2	6,2–9	1,6+5	1,6+2
U–230	20,8 сут		#5	1,7–5	5,9+1	8,1–3		#2	3,0–7	3,3+3	2,5
U –231	4,20 сут		#5	4,6–10	2,2+6	3,0+2		#2	2,0–9	5,0+5	5,0+2
U –232	72,0 лет		#5	1,0–5	1,0+2	1,4–2		#5	6,4–7	1,6+3	4,2–1
U –233	1,58+5 лет		#5	4,3–6	2,3+2	3,2–2		#2	1,4–7	7,1+3	2,7
U –234	2,44+5 лет		#5	4,2–6	2,4+2	3,3–2		#2	1,3–7	7,7+3	2,9
U –235	7,04+8 лет		#5	3,7–6	2,7+2	3,7–2		#2	1,3–7	7,7+3	3,0
U –236	2,34+7 лет		#5	3,9–6	2,6+2	3,5–2		#2	1,3–7	7,7+3	3,0
U –237	6,75 сут		#5	2,1–9	4,8+5	6,5+1		#2	5,4–9	1,9+5	1,8+2
U –238	4,47+9 лет		#5	3,4–6	2,9+2	4,0–2		#2	1,2–7	8,4+3	3,1
Np –234	4,40 сут		#2	3,0–9	3,3+5	1,8+2		#2	4,4–9	2,3+5	1,7+2
Np –235	1,08 лет		#5	5,1–10	2,0+6	2,7+2		#2	4,1–10	2,4+6	2,6+3
Np –236	1,15+5 лет		#6	3,2–6	3,1+2	3,9–2		#5	1,8–8	5,6+4	8,2
Np –237	2,14+6 лет		#6	2,3–5	4,3+1	5,4–3		#2	2,1–7	4,8+3	1,3
Np –238	2,12 сут		#6	2,1–9	4,8+5	5,9+1		#2	6,2–9	1,6+5	1,5+2
Np –239	2,36 сут		#5	1,2–9	8,3+5	1,1+2		#2	5,7–9	1,8+5	1,7+2
Pu –236	2,85 лет		#6	2,0–5	5,0+1	6,2–3		#2	2,2–7	4,5+3	1,6
Pu –237	45,3 сут		#5	4,3–10	2,3+6	3,2+2		#2	6,9–10	1,4+6	1,4+3
Pu –238	87,7 лет		#6	4,6–5	2,2+1	2,7–3		#2	4,0–7	2,5+3	6,0–1
Pu –239	2,41+4 лет		#6	5,0–5	2,0+1	2,5–3		#2	4,2–7	2,4+3	5,6–1
Pu–240	6,54+3 лет		#6	5,0–5	2,0+1	2,5–3		#2	4,2–7	2,4+3	5,6–1
Pu–241	14,4 лет		#6	9,0–7	1,1+3	1,4–1		#6	4,8–9	2,1+5	2,9+1

Pu-242	3,76+5 лет		#6	4,8-5	2,1+1	2,6-3		#2	4,0-7	2,5+3	5,8-1
Pu-244	8,26+7 лет		#6	4,7-5	2,1+1	2,6-3		#2	4,1-7	2,4+3	5,8-1
Pu-246	10,9сут		#5	9,1-9	1,1+5	1,5+1		#2	2,3-8	4,3+4	4,2+1
Am-240	2,12 сут		#2	2,2-9	4,5+5	2,4+2		#2	3,3-9	3,0+5	2,4+2
Am-241	4,32+2 лет		#6	4,2-5	2,4+1	2,9-3		#2	3,7-7	2,7+3	6,9-1
Am-242m	1,52+2 лет		#6	3,7-5	2,7+1	3,3-3		#2	3,0-7	3,3+3	7,3-1
Am-243	7,38+3 лет		#6	4,1-5	2,4+1	3,0-3		#2	3,7-7	2,7+3	6,9-1
Cm-240	27,0 сут		#5	3,8-6	2,6+2	3,6-2		#2	4,8-8	2,1+4	1,8+1
Cm-241	32,8 сут		#5	4,4-8	2,3+4	3,1		#2	5,7-9	1,8+5	1,5+2
C m -242	163 сут		#5	6,4-6	1,6+2	2,1-2		#2	7,6-8	1,3+4	1,2+1
Cm-243	28,5 лет		#6	3,1-5	3,2+1	4,0-3		#2	3,3-7	3,0+3	9,3-1
Cm-244	18,1 лет		#6	2,7-5	3,7+1	4,6-3		#2	2,9-7	3,4+3	1,2
Cm-245	8,50+3 лет		#6	4,2-5	2,4+1	2,9-3		#2	3,7-7	2,7+3	6,6-1
Cm-246	4,73+3 лет		#6	4,2-5	2,4+1	2,9-3		#2	3,7-7	2,7+3	6,6-1
Cm-247	1,56+7 лет		#6	3,9-5	2,6+1	3,2-3		#2	3,5-7	2,9+3	7,3-1
Cm-248	3,39+5 лет		#6	1,5-4	6,7	8,2-4		#2	1,4-6	7,1+2	1,8-1
Cm-250	6,90+3 лет		#6	8,4-4	1,2	1,5-4		#2	8,2-6	1,2+2	3,2-2
Bk -245	4,94 сут		#5	2,6-9	3,8+5	5,3+1		#2	3,9-9	2,6+5	2,4+2
Bk -246	1,83 сут		#2	1,7-9	5,9+5	3,1+2		#2	2,6-9	3,8+5	2,9+2
Bk -247	1,38+3 лет		#6	6,9-5	1,4+1	1,8-3		#2	8,6-7	1,2+3	4,0-1
Bk -249	320 сут		#6	1,6-7	6,3+3	7,7-1		#2	2,9-9	3,4+5	1,4+2
C f -246	1,49 сут		#5	5,7-7	1,8+3	2,4-1		#2	2,4-8	4,2+4	4,2+1
Cf -248	334 сут		#5	1,0-5	1,0+2	1,4-2		#2	1,6-7	6,3+3	5,0
Cf -249	3,50+2 лет		#6	7,0-5	1,4+1	1,8-3		#2	8,7-7	1,1+3	4,0-1
Cf -250	13,1 лет		#6	3,4-5	2,9+1	3,6-3		#2	5,5-7	1,8+3	8,7-1
Cf -251	8,98+2 лет		#6	7,1-5	1,4+1	1,7-3		#2	8,8-7	1,1+3	3,9-1
Cf -252	2,64 лет		#3	5,6-5	1,8+1	5,6-3		#2	5,1-7	2,0+3	1,5
Cf -253	17,8 сут		#5	1,7-6	5,9+2	8,1-2		#2	1,1-8	9,1+4	9,9+1
Cf -254	60,5 сут		#4	7,0-5	1,4+1	2,7-3		#2	2,6-6	3,8+2	3,5-1
Es -251	1,38 сут		#5	2,6-9	3,8+5	5,3+1		#2	1,2-9	8,3+5	8,2+2
Es-253	20,5 сут		#5	3,4-6	2,9+2	4,0-2		#2	4,5-8	2,2+4	2,3+1
Es-254	276 сут		#5	1,0-5	1,0+2	1,4-2		#2	1,6-7	6,3+3	5,0
Es -254 m	1,64 сут		#5	5,9-7	1,7+3	2,3-1		#2	3,0-8	3,3+4	3,3+1
Fm -253	3,00 сут		#5	5,0-7	2,0+3	2,7-1		#2	6,7-9	1,5+5	1,5+2
Fm -257	101 сут		#5	8,8-6	1,1+2	1,6-2		#2	1,1-7	9,1+3	9,3
Md -258	55,0 сут		#5	7,3-6	1,4+2	1,9-2		#2	8,9-8	1,1+4	1,1+1

Приложение 8

Распределение соединений элементов по типам при ингаляции

Элемент	Символ	Тип	Химические соединения
Тритий	Т	Г1	Пары тритированной воды
		Г2	Газообразный тритий
		Г3	Тритированный метан
Бериллий	Be	М	Оксиды, галогениды, нитраты
		П	Иные соединения
Углерод	С	Г	Элементарный углерод
		Г2	Диоксид углерода (CO ₂)
		Г3	Оксид углерода (CO)
Фтор	F	М	Соединения с лантаноидами
		Б	Соединения с H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr
		П	Иные соединения
Натрий	Na	Б	Все соединения
Магний	Mg	П	Оксиды, гидроксиды, карбиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Алюминий	Al	П	Оксиды, гидроксиды, карбиды, галогениды, нитраты, металл
		Б	Иные соединения
Кремний	Si	М	Алюмосиликаты (стекло)
		П	Оксиды, гидроксиды, карбиды, нитраты
		Б	Иные соединения
Фосфор	P	П	Фосфаты Zn ²⁺ , Sn ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe ³⁺ , Bi и лантаноидов
		Б	Иные соединения
Сера	S	П	Сера в элементарной форме сульфиды Sr, Ba, Ge, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Ag, Cu, Au, Zn, Cd, Hg, Mo, W сульфаты Ca, Sr, Ba, Ra, As, Sb, Bi
		Б	Иные соединения
		Г1	Сульфид углерода (CS ₂)
		Г2	Диоксид серы (SO ₂)
Хлор	Cl	Б	Соединения с H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr
		П	Иные соединения
Калий	K	Б	Все соединения
Кальций	Ca	П	Все соединения
Скандий	Sc	М	Все соединения
Титан	Ti	М	SrTiO ₃
		П	Оксиды, гидроксиды, карбиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Ванадий	V	П	Оксиды, гидроксиды, карбиды, галогениды
		Б	Иные соединения
Хром	Cr	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Марганец	Mn	П	Оксиды, гидроксиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Железо	Fe	П	Оксиды, гидроксиды, галогениды
		Б	Иные соединения
Кобальт	Co	М	Оксиды, гидроксиды, галогениды, нитраты
		П	Иные соединения
Никель	Ni	П	Оксиды, гидроксиды, карбиды
		Б	Иные соединения
		Г	Газообразный Ni (CO) ₄
Медь	Cu	М	Оксиды, гидроксиды

		П	Сульфиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные неорганические соединения
Цинк	Zn	М	Все соединения
Галлий	Ga	П	Оксиды, гидроксиды, карбиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Германий	Ge	П	Оксиды, сульфиды, галогениды
		Б	Иные соединения
Мышьяк	As	П	Все соединения
Селен	Se	П	Селен в элементарной форме
		Б	Иные неорганические соединения
Бром	Br	Б	Соединения с H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr
		П	Иные соединения
Рубидий	Rb	Б	Все соединения
Стронций	Sr	М	SrTiO ₃
		Б	Иные соединения
Иттрий	Y	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Иные соединения
Цирконий	Zr	М	Карбид
		П	Оксиды, гидроксиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Ниобий	Nb	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Иные соединения
Молибден	Mo	М	Оксиды, гидроксиды, MoS ₂
		Б	Иные соединения
Технеций	Te	П	Оксиды, гидроксиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Рутений	Ru	М	Оксиды, гидроксиды, металл
		П	Галогениды
		Г	Тетраоксид рутения RuO ₄
Родий	Rh	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Галогениды
		Б	Иные соединения
Палладий	Pd	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Серебро	Ag	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Нитраты, сульфиды
		Б	Иные соединения
Кадмий	Cd	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Сульфиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Индий	In	П	Оксиды, гидроксиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Олово	Sn	П	Оксиды, гидроксиды, сульфиды, галогениды, нитраты, фосфат
		Б	Иные соединения
Сурьма	Sb	П	Оксиды, гидроксиды, галогениды, сульфиды, сульфаты, нитраты
		Б	Иные соединения
Теллур	Te	П	Оксиды, гидроксиды, нитраты
		Б	Иные соединения
		Г	Пары теллура
Иод	I	Б	Все соединения
		Г1	Элементарный иод
		Г2	Метилиод CH ₃ I
Цезий	Cs	Б	Все соединения
Барий	Ba	Б	Все соединения

Лантан	La	П	Оксиды, гидроксиды
		Б	Иные соединения
Церий	Ce	М	Оксиды, гидроксиды, фториды
		П	Иные соединения
Празеодим	Pr	М	Оксиды, гидроксиды, карбиды, ториды
		П	Иные соединения
Неодим	Nd	М	Оксиды, гидроксиды, карбиды, фториды
		П	Иные соединения
Прометий	Pm	М	Оксиды, гидроксиды, карбиды, фториды
		П	Иные соединения
Самарий	Sm	П	Все соединения
Европий	Eu	П	Все соединения
Гадолиний	Gd	П	Труднорастворимые соединения, оксиды, гидроксиды, фториды
		Б	Иные соединения
Тербий	Tb	П	Все соединения
Диспозий	Dy	П	Все соединения :
Гольмий	Ho	П	Все соединения
Эрбий	Er	П	Все соединения
Тулий	Tm	П	Все соединения
Иттербий	Yb	М	Оксиды, гидроксиды, фториды
		П	Иные соединения
Лютеций	Lu	М	Оксиды, гидроксиды, фториды
		П	Иные соединения
Гафний	Hf	П	Оксиды, гидроксиды, карбиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Тантал	Ta	М	Элементарный тантал, оксиды, гидроксиды, галогениды, карбиды, нитраты, нитриды
		П	Иные соединения
Вольфрам	W	Б	Все соединения
Рений	Re	П	Оксиды, гидроксиды, галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Осмий	Os	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Ирридий	Ir	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Галогениды, нитраты, элементарный ирридий
		Б	Иные соединения
Платина	Pt	Б	Все соединения
Золото	Au	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Ртуть	Hg	П (но)	Оксиды, гидроксиды, галогениды, нитраты, сульфиды
		Б (но)	Сульфаты
		Б (ор)	Все органические соединения
		Г	Пары ртути
Таллий	Tl	Б	Все соединения
Свинец	Pb	Б	Все соединения
Висмут	Bi	Б	Нитраты
		П	Иные соединения
Полоний	Po	П	Оксиды, гидроксиды, нитраты
		Б	Иные соединения
Астат	At	Б	Соединения с H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr
		П	Иные соединения
Франций	Fr	Б	Все соединения
Радий	Ra	П	Все соединения

Актиний	Ac	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Галогениды, нитраты
		Б	Иные соединения
Торий	Th	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Иные соединения
Протактиний	Pa	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Иные соединения
Уран	U	Б	UF ₆ , UO ₂ F ₂ , UO ₂ (NO ₃) ₂
		П	UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄
		М	UO ₂ , U ₃ O ₈
Нептуний	Np	П	Все соединения
Плутоний	Pu	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Иные соединения кроме хелатов
Америций	Am	П	Все соединения
Кюрий	Cm	П	Все соединения
Берклий	Bk	П	Все соединения
Калифорний	Cf	М	Оксиды, гидроксиды
		П	Иные соединения
Эйнштейний	Es	П	Все соединения
Фермий	Fm	П	Все соединения

Учебное издание

**Ерофеев Виталий Андреевич
Черкашина Наталья Игоревна**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Изд. № 202/2020. Объем 10,5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»