

В. В. Турбаевский

ОП «Запорожская АЭС» ГП НАЭК «Энергоатом»,
г. Энергодар, Украина

Совершенствование системы контрольных уровней радиационных параметров на атомных электростанциях

Предложен новый подход к установлению контрольных и административно-технологических уровней, характеризующих состояние радиационной безопасности АЭС, а также к подготовке отчетной документации в части предоставления данных измерений, близких к минимально-детектируемому величинам.

Ключевые слова: контрольные уровни, карта Шухарта, минимально-детектируемая активность.

В. В. Турбаєвський

Вдосконалення системи контрольних рівнів радіаційних параметрів на атомних електростанціях

Запропоновано новий підхід до встановлення контрольних та адміністративно-технологічних рівнів, що характеризують стан радіаційної безпеки АЕС, а також до підготовки звітної документації в частині надання даних вимірювань, близьких до мінімально-детектованих величин.

Ключові слова: контрольні рівні, карта Шухарта, мінімально-детектована активність.

В соответствии с действующими нормами радиационной безопасности Украины (НРБУ-97), контрольные уровни (КУ) устанавливаются «с целью фиксации достигнутого уровня радиационной безопасности на данном радиационно-ядерном объекте, в населенном пункте и окружающей среде» [1]. Согласно требованиям ОСПУ-2005 [2], КУ должны пересматриваться не реже, чем раз в пять лет. В настоящее время уровень радиационной безопасности на АЭС Украины находится на достаточно высоком уровне, величины водных сбросов (далее — сбросов) и газо-аэрозольных выбросов (далее — выбросов) радиоактивных веществ, в пересчете на дозу населения, приближаются к минимально-измеряемым величинам. При этом существующий подход к определению КУ не в полной мере соответствует требованиям стандартов в области обеспечения качества, что приведет к нерациональному расходованию ресурсов при не всегда обоснованных пересмотрах действующих уровней, а также к реализации мероприятий для устранения отклонений, которые не являются таковыми с точки зрения статистических колебаний процесса.

Действующий подход к установлению контрольных уровней заключается в статистической обработке данных (выбросов и сбросов радиоактивных веществ) за предыдущие пять лет эксплуатации АЭС. Статистическая обработка выполняется в соответствии с методическими рекомендациями государственного предприятия «Национальная атомная энергогенерирующая компания “Энергоатом”» (ГП НАЭК) [3]. Согласно указанному документу, полученные в результате анализа величины КУ должны предполагать превышение установленного лимита один раз в пять лет.

Поскольку величины выбросов и сбросов с АЭС Украины находятся на весьма низком уровне — доли процента допустимых уровней (ДУ) для выбросов и несколько процентов ДУ для сбросов, — важно определить критерии вмешательства при изменении тенденции в величине выбросов и сбросов для исключения необоснованного воздействия на систему, а также установить необходимость и целесообразность изменения КУ при изменении выбросов и сбросов радиоактивных веществ во времени.

Применяемый подход к определению КУ [3] не в полной мере удовлетворяет требованиям к системе обеспечения качества ДСТУ ISO 9001:2009 [4], не предполагает использование процессного подхода в системе экологического управления, как это предусмотрено в ДСТУ ISO 14001:2006 [5], и статистических методов, предусмотренных ДСТУ ISO/TR 10017:2005 [6] и ДСТУ ISO 11462-1:2006 [7].

Целью исследования является определение критериев оптимизации КУ на АЭС Украины и оптимальной периодичности изменения КУ, определение контролируемых факторов, оценка неопределенности при использовании минимально-детектируемой и минимально-измеряемой активностей (МДА и МИА). В работе широко использовались указанные международные стандарты в области обеспечения качества и обработки статистических данных, а также свободное статистическое программное обеспечение R [8].

Анализ выбросов и сбросов АЭС. Для определения видов изменчивости процессов выбросов и сбросов радиоактивных веществ использовались контрольные карты Шухарта (ККШ), детально описанные в стандарте ISO 8258-91 [9], а также пакет qcc (Quality Control Charts) [10] к программному обеспечению R [8]. Как указано в [9], теория контрольных карт различает два вида изменчивости.

Первый вид — изменчивость из-за «случайных (обычных) причин», обусловленная набором разнообразных причин, присутствующих постоянно, которые нелегко или невозможно выявить. Каждая из таких причин составляет очень малую долю общей изменчивости, и ни одна из них не значима сама по себе. Тем не менее, сумма этих причин измерима и предполагается, что эта сумма, характеризующая изменчивость, внутренне присуща процессу. Исключение или уменьшение влияния обычных причин требует управленческих решений и выделения ресурсов на улучшение процесса и системы.

Второй вид — реальные перемены в процессе. Они могут быть следствием некоторых определяемых причин, не присущих процессу внутренне, и могут быть устранены, по крайней мере, теоретически. Эти выявляемые причины рассматриваются как «неслучайные» или «особые» причины изменения. К ним могут быть отнесены недостаточная однородность процесса, недостаточная квалификация персонала, неправильное выполнение процедур и т. д.

Цель контрольных карт — обнаружить неестественные изменения в данных из повторяющихся процессов и дать критерии для обнаружения отсутствия статистической управляемости. Процесс находится в статистически управляемом состоянии, если изменчивость вызвана только случайными причинами. При определении этого приемлемого уровня изменчивости любое отклонение от него считают результатом действия особых причин, которые следует выявить, исключить или ослабить.

Задача статистического управления процессами — обеспечение и поддержание процессов на приемлемом и стабильном уровне с гарантией соответствия параметров выбросов и сбросов установленным требованиям. Главным статистическим инструментом, используемым для этого, — контрольная карта, являющаяся графическим способом представления и сопоставления информации, основанной на последовательности выборок, отражающих текущее состояние процесса, с границами, установленными на основе внутренне присущей процессу изменчивости. Метод контрольных карт помогает определить, действительно ли процесс достиг статистически управляемого состояния на правильно заданном уровне или остается в этом состоянии, а затем поддерживать управление и высокую степень однородности важнейших характеристик процесса посредством непрерывной (периодической) записи информации о качестве процесса. Использование контрольных карт и их тщательный анализ ведут к лучшему пониманию и совершенствованию процессов.

Выполняя с помощью ККШ анализ среднемесячных выбросов АЭС за период с 2002 по 2011 гг., при построении контрольных карт использовались измеренные значения активности радионуклидов, в том числе для случаев, когда эти значения были менее МДА (такая особенность анализа объяснена далее).

Ниже приведены результаты работы пакета qcc для радионуклида Cr-51 и Mn-54.

Контрольные границы на карте Шухарта находятся на расстоянии 3σ от центральной линии, где σ — генеральное стандартное отклонение используемой статистики. Изменчивость внутри подгрупп является мерой случайных вариаций. Для получения оценки вычисляют выборочное стандартное отклонение или умножают выборочный размах на соответствующий коэффициент. Эта мера не включает межгрупповых вариаций, а оценивает только изменчивость внутри подгрупп.

Границы $\pm 3\sigma$ указывают, что приблизительно 99,7 % значений характеристики подгрупп попадут в эти пределы при условии, что процесс находится в статистически управляемом состоянии. Другими словами, есть риск, равный 0,3 % (или в среднем три на тысячу случаев), что нанесенная точка окажется вне контрольных границ, когда процесс стабилен. Употребляется слово «приблизительно», поскольку отклонения от исходных предположений, таких как вид распределения данных, будут влиять на значения вероятности.

Назначение системы управления процессом состоит в получении статистического сигнала о наличии особых (неслучайных) причин вариаций. Систематическое устранение особых причин избыточной изменчивости приводит процесс в состояние статистической управляемости. Если процесс находится в статистически управляемом состоянии, качество продукции предсказуемо и процесс пригоден для удовлетворения требований, установленных в нормативных документах.

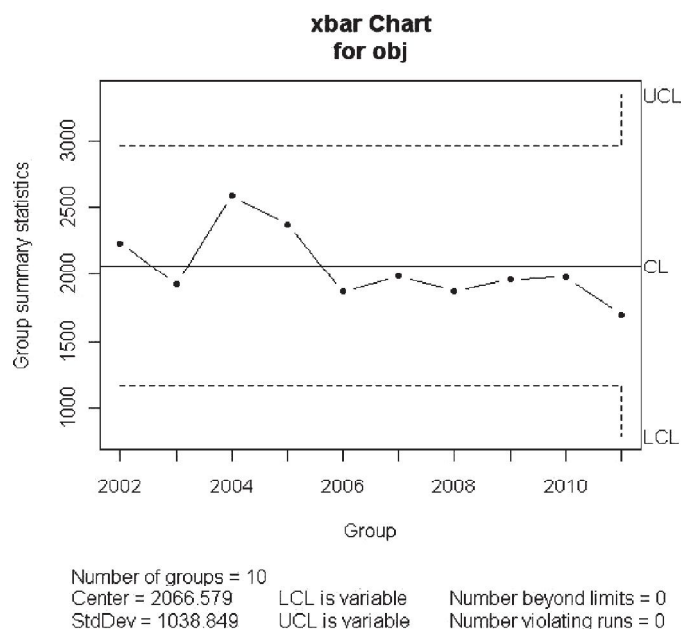


Рис. 1. Контрольная карта Шухарта для выброса радионуклида Cr-51 с АЭС

Анализ рис. 1 показывает, что выбросы хрома-51 с 2002 г. находились в области статистически управляемого процесса и не требуют управляющего вмешательства.

На рис. 2, характеризующем выбросы марганца-54 за тот же период времени, видно, что с 2002 по 2004 гг. процесс находился вне статистически управляемой зоны, но к настоящему моменту вернулся в управляемое состояние и не требует вмешательства.

Важным моментом является определение значений контрольных границ. В случае если устанавливается только одна контрольная граница с каждой стороны от установившихся значений (что актуально для исследуемой ситуации), ее величина определяется программно либо вычисляется на основе [9]. Так, для выбросов изотопа Cr-51 с 2002 по 2010 гг. верхняя контрольная граница для среднемесячного выброса равна 4085 кБк/мес, а нижняя — 88 кБк/мес. Для сравнения, действующий контрольный уровень для выброса указанного изотопа составляет 31000 кБк/мес.

Очевидно, что установленный КУ в принципе не выполняет возложенную на него функцию «фиксации достигнутого уровня радиационной безопасности на данном радиационно-ядерном объекте» [1], так как является недостижимым.

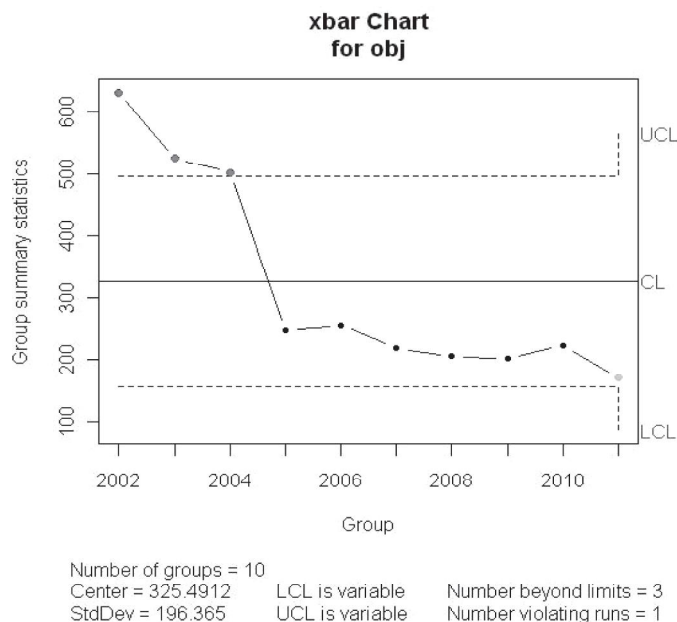


Рис. 2. Контрольная карта Шухарта для выбросов Mn-54

Этот факт подтверждает и построение диаграммы распределения результатов измерений (рис. 3), которая позволяет рассчитать индекс воспроизводимости, равный 9,28. Это подтверждает недостижимость верхней допустимой границы, в нашем случае равной КУ.

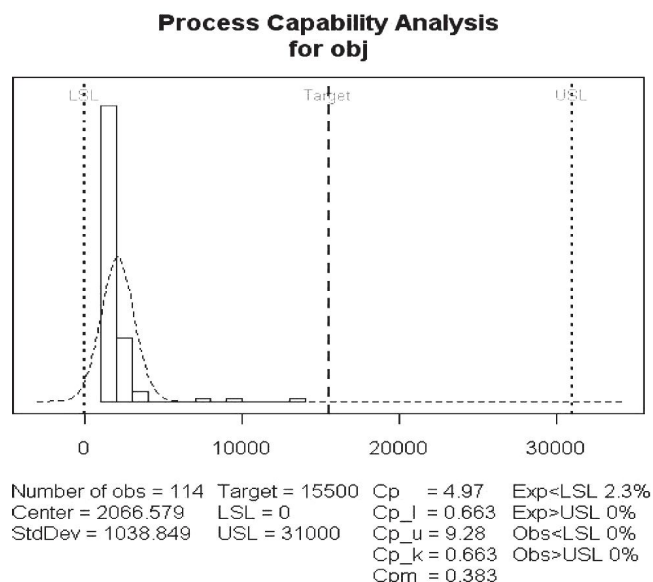


Рис. 3. Распределение результатов измерения активности Sr-90 в выбросах

Исходя из изложенного, для оперативной оценки состояния радиационной безопасности АЭС в части выбросов и сбросов радиоактивных веществ, в соответствии

с требованиями национальных и международных стандартов в области качества, целесообразно использовать ККШ в автоматическом (с использованием статистического пакета R [8] с пакетом qcc [10]) или ручном режиме. Использование ККШ возможно как для радионуклидов ежесуточного контроля (контроль выбросов инертных радиоактивных газов — ИРГ, долгоживущих нуклидов — ДЖН, йода во всех формах), так и для нуклидов месячного, квартального или иного контроля.

Ввод в эксплуатацию разработанной автором новой базы данных (БД) по оценке источников выброса в лаборатории внешнего радиационного контроля позволит включить в БД функцию автоматического определения статистической устойчивости процесса и реализует контроль качества на новом уровне.

Использование ККШ позволит оперативно реагировать на потерю стабильности статистической характеристики, своевременно выявлять и устранять нарушения процесса, не затрачивая при этом дополнительные усилия на устранение несуществующих (статистических) отклонений.

В связи с тем, что нормативная документация [1, 2] предписывает назначение КУ для различных объектов или процессов, вероятно, целесообразно установить КУ равным 70 % действующих допустимых уровней сброса и выброса, а для оперативного контроля, управления процессом на уровне объекта (энергоблока или АЭС в целом), а также для различных режимов эксплуатации использовать ККШ. При этом значительно повысится управляемость процессом за счет осуществления качественного контроля и анализа, сократятся расходы на пересмотр КУ. Часть функций оперативного контроля выполняющих введенные на АЭС административно-технологические уровни (А-ТУ) [11], но порядок их назначения и интерпретации также не отвечает требованиям стандартов в области качества. Не следует забывать, что в настоящий момент, как было показано выше, КУ не выполняют возложенные на них функции, однако отмена КУ, вероятно, в силу административных причин будет затруднительна.

В табл. 1 приведены расчетные значения верхней контрольной границы для контролируемых радионуклидов и их отношение к действующим КУ. Как видно из таблицы, действующие КУ в среднем на 80 % выше необходимых для контроля процесса величин, а А-ТУ предложены только для ограниченной группы нуклидов и так же, как и КУ, не отвечают поставленным задачам оперативного контроля для ИРГ и изотопов йода.

Не следует также забывать о различных уровнях контроля. Так, при превышении КУ до 5 раз (при пятикратном превышении допустимого *суточного* выброса (происшествие категории П01/2 в соответствии с [12])) создается комиссия Министерства энергетики и угольной промышленности Украины с привлечением Государственной инспекции ядерного регулирования Украины. При превышении КУ более чем в 5 раз, в соответствии с пп. 14.6.12–13 ОСПУ-2005 [2], дополнительно привлекаются специалисты Министерства охраны здоровья Украины.

Столь высокий уровень контроля может способствовать ситуации, когда эксплуатирующая организация устанавливает заведомо завышенные уровни для контроля радиационных параметров, в свою очередь, лишает такой контроль смысла, указанного в п. 14.6.6 ОСПУ [2]. Назначение же на площадках АЭС локальных уровней реагирования, рассчитанных как верхние контрольные границы (UCL), позволит АЭС своевременно реагировать на отклонения

Таблица 1. Верхняя контрольная граница (расчетная), контрольные и административно-технологические уровни, и их отношение

Нуклид	Единицы	КУ-2009	UCL	UCL/КУ, %	A-ТУ	UCL/A-ТУ, %
ИРГ	ГБк/сут	1,3E+03	1,7E+02	13	8,0E+02	21
ДЖН	кБк/сут	5,3E+03	1,3E+03	25	1,5E+03	87
Йоды	кБк/сут	1,6E+05	2,1E+03	1	1,0E+04	21
Cr-51	кБк/мес	3,1E+04	4,0E+03	13		
Mn-54	кБк/мес	4,2E+03	8,2E+02	19		
Fe-59	кБк/мес	2,2E+03	5,3E+02	24		
Co-58	кБк/мес	6,9E+03	1,1E+03	16		
Co-60	кБк/мес	1,1E+04	2,9E+03	27	4,0E+03	73
Zr-95	кБк/мес	4,8E+03	8,0E+02	17		
Nb-95	кБк/мес	7,8E+03	1,1E+03	14		
Ag-110m	кБк/мес	2,5E+03	8,0E+02	32		
Cs-134	кБк/мес	1,1E+04	2,2E+03	20		
Cs-137	кБк/мес	1,3E+04	3,2E+03	24	4,0E+03	79
Sr-89	кБк/квартал	1,4E+04	3,7E+03	26		
Sr-90	кБк/квартал	1,1E+03	3,3E+02	30		

в процессе. При этом расследование происшествия целесообразно выполнять силами персонала площадки АЭС, являющегося свидетелями происшествия, как это предусмотрено международными руководствами по качеству.

Проблемах использования МИА и МДА. В соответствии с [13], МИА — это минимальная удельная активность радионуклида, которая может быть измерена прибором в счетном образце за определенное время с погрешностью, не выше заданной, и доверительной вероятностью 0,95. Российские нормы [14] определяют МИА как активность радионуклида в счетном образце, при измерении которой на данной радиометрической установке за время экспозиции 1 ч относительная случайная (статистическая) погрешность результата измерений составляет 50 % при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Общепринятой характеристикой, определяющей точность измерений активности на сцинтилляционном спектрометре, является интервал неопределенности измеренной величины ($A_{\text{изм}} - U(-)$ ч $A_{\text{изм}} + U(+)$). Ширина этого интервала определяется таким образом, чтобы истинное значение активности с вероятностью 95 % находилось в нем [15].

Понятие минимально детектируемой активности является характеристикой каждого отдельного измерения и рассчитывается для доверительной вероятности 0,9 (вероятность ошибки в одну сторону 5 %). Минимальная измеряемая активность является характеристикой измерительной установки и рассчитывается исходя из доверительной вероятности 0,95 (вероятность ошибки в одну сторону 2,5 %).

В том случае, когда этого требуют правила оформления, в протоколе измерений, вероятно, следует указывать зна-

чение минимальной детектируемой активности, рассчитанной для условий этого измерения, а не значение МИА из свидетельства о поверке установки.

Если полученное значение активности меньше либо сравнимо со значением собственной неопределенности, значение МДА можно рассчитать как $MDA = 1,65U$, где U — значение неопределенности, рассчитанное программой обработки спектра.

В настоящее время нормативная документация по подготовке отчетов [16] предписывает для случаев, когда измеренная активность образца менее МИА, указывать значение, равное половине МИА, и дополнять запись знаком <. Такая запись вводит в заблуждение не только общественность, которая, в соответствии с Законом об информации, может получать доступ к данным о состоянии радиационной безопасности, но и специалистов, для которых запись «<6.5E+01 кБк/квартал» (например, для Sr-89 в выбросах энергоблоков) является малоинформативной, так как не указывает границы измеренной величины с установленной вероятностью и погрешностью. Кроме того, единственная цифровая величина не позволяет использовать полученные данные в системе управления качеством, затрудняя сравнение величин, измеренных с различными погрешностями и вероятностями. А использование в отчетах, предусмотренных [16], суммирования величин со значениями менее МИА как значений, равных половине МИА, приводит к ситуации, когда нуклид, реально практически никогда не детектируемый (например, Fe-59), демонстрируется как значимый.

Вероятно, наиболее правильным решением может быть указание во всей отчетной документации значения

измеренной величины в формате «Активность \pm погрешность измерений ($P=0,95$)» для случая, когда измеренная величина больше МДА, или «< МДА (МДА=XX)» в ином случае [16–20]. Определение МДА и погрешности измерений активности подробно описано в [20].

Для поиска особых причин при использовании карт Шухарта в анализе процессов, тем не менее, наиболее приемлемым может стать использование *реально измеренных величин*, даже для случаев, когда это значение находится ниже МДА.

Выводы

Используемые в настоящее время методики установления контрольных и административно-технологических уровней параметров, характеризующих состояние радиационной безопасности объекта, не в полной мере отвечают поставленным задачам оперативного обнаружения отклонений и сохранения достигнутого уровня радиационной безопасности. Решением проблемы может стать преобразование А-ТУ в уровни исследования, определенные на основе контрольных карт Шухарта. При этом контрольные уровни (при необходимости их сохранения) могут быть установлены на величине в 70 % допустимых уровней и автоматически изменяться при пересмотре последних.

Периодичность пересмотра допустимых уровней, вероятно, должна устанавливаться не декларативно (один раз в три года), а соответствовать серьезным изменениям технологии процесса. В случае отсутствия изменения технологии и демографического, гидрогеологического и метеорологического состояния региона пересмотр допустимых уровней не целесообразен.

При построении ККШ целесообразно использовать значения активности, даже если они меньше МДА. Такой подход связан с особенностями статистической обработки данных и не должен влиять на точность и правильность полученного результата.

При подготовке отчетной документации и протоколов измерений следует указывать измеренную величину с указанием погрешности измерения. Если измеренная величина менее МДА, следует выполнять запись «<МДА (МДА=XXX)». При суммировании данных, содержащих значения менее МДА, последние нужно обнулять, так как вероятность их определения слишком мала. При этом сумму активностей можно записать, например, в виде «XXX \pm XX (<МДА — XX значений, для которых средняя МДА — XX)». При этом средняя МДА может определяться как среднеарифметическое значение.

В настоящее время ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом», с привлечением специалистов ЗАО НИИ радиационной защиты АТН Украины, выполняется пересмотр стандарта (методических указаний) по установлению контрольных уровней радиационных параметров. Автор надеется, что изложенные в данной статье соображения могут оказаться полезными при пересмотре названного стандарта.

Список использованной литературы

1. Нормы радиационной безопасности Украины. Государственные гигиенические нормативы: ГГН-6.6.1.-6.5.001-98. — К., 1998. — 31 с.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности Украины. — К., 2005. — 45 с.

3. Стандарт предприятия. Контрольные уровни радиационных параметров на атомных электрических станциях (радиационно-гигиенические регламенты I группы). Общие правила установления. Методические указания: СТП 0.26.040-2002. — К., 2002. — 30 с.

4. ДСТУ ISO 9001:2009. Национальный стандарт Украины. Системы управления качеством. Требования. — К.: Госпотребстандарт, 2009. — 36 с.

5. ДСТУ ISO 14001:2006. Национальный стандарт Украины. Системы экологического управления. Требования и рекомендации по применению. — К.: Госпотребстандарт, 2006. — 27 с.

6. ДСТУ ISO 10017:2005. Национальный стандарт Украины. Руководство по статистическим методам применительно к ISO 9001:2000. — К., Госпотребстандарт, 2005. — 33 с.

7. ДСТУ ISO 11462-1:2006. Статистический контроль. Руководство по внедрению статистического контроля процессов (СКП). — Ч. 1: Элементы статистического контроля за процессом (СКП) (ISO 11462-1:2001, IDT). — К.: Госпотребстандарт, 2006. — 28 с.

8. R Development Core Team (2010). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. — Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. — <http://www.R-project.org>.

9. ИСО 8258-91. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. — К.: Госпотребстандарт, 1999. — 38 с.

10. qcc: An R package for quality control charting and statistical process control // R news, Vol. 4/1, June 2004. — P. 11–17.

11. ПЛ-Д.0.26.347-05. Положение об административно-технологических уровнях радиационных параметров на АЭС. — К., 2005. — 15 с.

12. НП 306.2.100-2004. Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе атомных станций. — К., 2011. — 51 с.

13. Про затвердження Гігієнічного нормативу «Гігієнічний норматив питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у рослинній лікарській сировині (субстанції), що використовується для виготовлення лікарських засобів»: Наказ М-ва охорони здоров'я від 08.05.2008 № 240.

14. Методические указания МУК 4.3.2503-09. Стронций-90. Определение удельной активности в пищевых продуктах. — М., ФГУ «ФМБП», 2009. — 19 с.

15. Характеристики точности измерений активности на спонтанном гамма-спектрометре / Н. С. Антропова, С. Ю. Антропов, В. С. Божко, Ф. П. Вайтехович; НТЦ «Амплитуда». — <http://nucline.ru/node/5>.

16. СОУ-Н ЯЕК 1.009:2008. Правила составления отчетов по радиационной безопасности на АЭС. — К.: Минтопэнерго; НАЭК, 2008. — 29 с.

17. Руководство по выражению неопределенности измерения / ГП ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева. — С.-Пб., 1999. — 135 с.

18. ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. — Ч. 1: Основные положения и определения. — М., 2002. — 26 с.

19. ИСО МЭК 17025-2000. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. — М., 2000. — 28 с.

20. Мониторинг радиоактивного йода в случае масштабной радиационной аварии. Методические указания МУ 2.6.1.2396-08. — М., 2008. — 37 с.

Получено 26.08.2011.