

**В.В. ТУРБАЕВСКИЙ**

*ОП «Запорожская АЭС» ГП НАЭК «Энергоатом», г. Запорожье*

## **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-детектируемым величинам.*

### **Введение**

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 требований 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 приводит к нерациональному расходованию ресурсов при не всегда обоснованных пересмотрах действующих уровней, а также реализацией мероприятий для устранения отклонений, которые не являются таковыми с точки зрения статистических колебаний процесса.

### **Действующий подход к установлению КУ**

КУ устанавливаются в результате статистической обработки 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 указанного документа, полученные в результате анализа величины КУ должны предполагать превышение установленного лимита один раз в пять лет.

### **Недостатки используемого подхода**

Как было указано ранее, величины выбросов и сбросов с АЭС Украины находятся на весьма низком уровне, составляющем доли процента от допустимых уровней (ДУ) для выбросов и несколько процентов от ДУ для сбросов, поэтому 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 в настоящее время подход к определению КУ [3] не в полной мере удовлетворяет требованиям к системе обеспечения качества ДСТУ ISO 9001:2009 [4], не предполагает использования 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].

## **Цель работы**

Целью исследования является определение критериев оптимизации КУ на АЭС Украины, определение оптимальной периодичности изменения КУ, выделение контролируемых факторов и оценка неопределенности при использовании минимально-детектируемой и минимально-измеряемой активностей (МДА и МИА). В работе широко использовались указанные в предыдущем разделе 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.

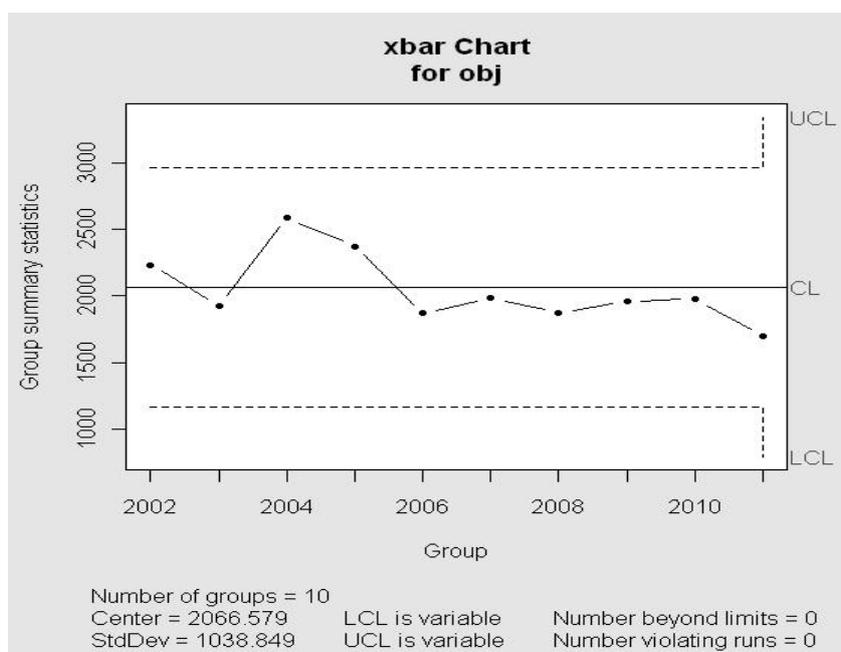
Первый вид – изменчивость из-за "случайных (обычных) причин", обусловленная бесчисленным набором разнообразных причин, присутствующих постоянно, которые нелегко или невозможно выявить. Каждая из таких причин составляет очень малую долю общей изменчивости, и ни одна из них не значима сама по себе. Тем не менее сумма всех этих причин измерима и предполагается, что она 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 отнесена 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, гарантируя соответствия параметров выбросов и сбросов установленным требованиям. Главный статистический инструмент, используемый 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.

Выполним с помощью ККШ анализ среднемесячных выбросов АЭС за период с 2002 по 2011 год. При построении контрольных карт использовались измеренные значения активности радионуклидов, даже для случаев, когда эти значения были менее минимально детектируемой активности (МДА).



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

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

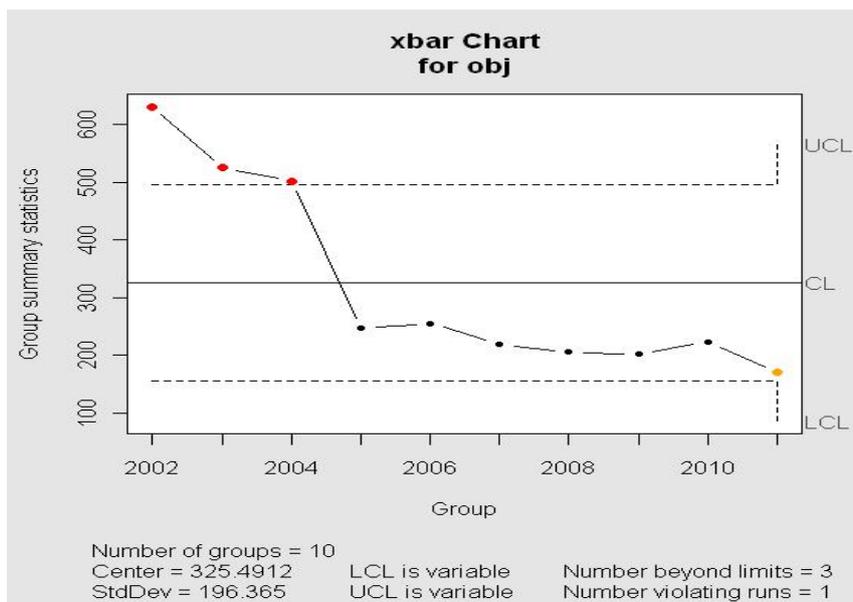
Контрольные границы на карте Шухарта находятся на расстоянии  $3\sigma$  от центральной линии, где  $\sigma$  – генеральное стандартное отклонение используемой статистики. Изменчивость внутри подгрупп является мерой случайных вариаций. Для получения оценки вычисляют выборочное стандартное отклонение 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 около 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.

Анализ рис.1 показывает, что выбросы хрома-51 с 2002 года находились в области статистически управляемого процесса и не требует управляющего вмешательства. На рис.2, характеризующем выбросы марганца-54 за тот же период времени, видно, что в ранний период времени, с 2002 по 2004 гг., процесс находился вне статистически управляемой зоны, но к настоящему моменту вернулся в управляемое состояние и не требует вмешательств.

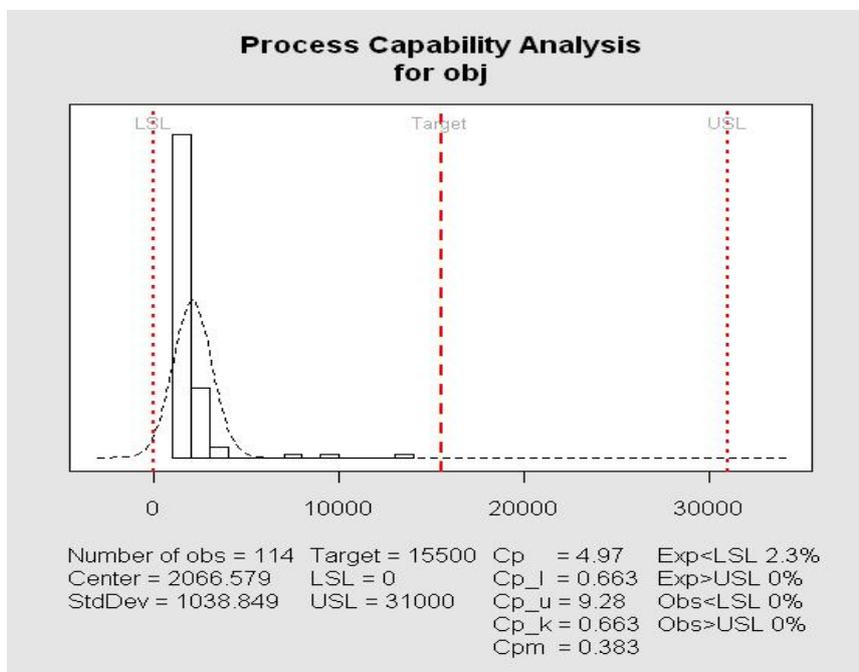
Важным моментом является определение значений контрольных границ. В случае, если устанавливается только одна контрольная граница с каждой стороны от установившихся значений (что актуально для исследуемой ситуации), ее величина определяется программно, либо вычисляется на основе [9]. Так, для выбросов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



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

Для сравнения, величина действующего контрольного уровня 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.

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 Cr-51 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 (ЛВРК) 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, при этом не затрачивая 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% от действующих допустимых уровней сброса и выброса, а для оперативного контроля и 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 выполняют 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 таблице 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, как и КУ, не отвечают поставленным задачам оперативного контроля для ИРГ и изотопов йода.

**Таблица.** Отношение верхней контрольной границы к действующим КУ и А-ТУ для Запорожской АЭС

Нуклид	Единицы	КУ-2009	UCL	UCL/КУ, %	А-ТУ	UCL/А-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%
Сг-51	кБк/мес	3,1E+04	4,0E+03	13%		
Мп-54	кБк/мес	4,2E+03	8,2E+02	19%		
Fe-59	кБк/мес	2,2E+03	5,3E+02	24%		
Со-58	кБк/мес	6,9E+03	1,1E+03	16%		
Со-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/кв	1,4E+04	3,7E+03	26%		
Sr-90	кБк/кв	1,1E+03	3,3E+02	30%		

Не следует также забывать о различных уровнях контроля. Так, при превышении КУ, при условии пятикратного превышения допустимого суточного выброса (пришестствие

категории П01/2 в соответствии с [12]) создается комиссия Министерства топлива и угольной промышленности Украины, с привлечением Государственной инспекции ядерного регулирования Украины. В соответствии с пп. 14.6.12-13 ОСПУ-2005 [2], превышение КУ более, чем в пять раз, расследуется комиссией с привлечением специалистов СЭС МОЗУ. Столь высокий уровень контроля может способствовать ситуации, когда эксплуатирующая организация устанавливает заведомо завышенные уровни для контроля радиационных параметров, что, 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 в процессе. При этом расследование происшествия целесообразно выполнять силами персонала площадки АЭС, являющегося свидетелями происшествия, как это предусмотрено международными руководствами по качеству.

### **О 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 один час 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 ( $A_{изм}-U(-) \div A_{изм}+U(+)$ ). Ширина этого интервала определяется таким образом, чтобы истинное значение активности с вероятностью 95% находилось в этом интервале [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 значение минимальной детектируемой активности, рассчитанной для условий этого измерения, а не значение МИА из свидетельства о поверке установки.

В том случае, если полученное значение активности меньше, либо сравнимо со значением собственной неопределенности, значение МДА можно рассчитать как  $MDA = 1,65 * U$ , 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+01кБк/квартал» (например, для Sr-89 в выбросах энергоблоков) является малоинформативной, т.к. не указывает границы измеренной величины с установленной вероятностью и погрешностью. Кроме того, использование единственной цифровой величины не позволяет использовать полученные данные о системе управления качеством, так как затрудняет 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 величины МДА и погрешности для измерений активности подробно описано в [20].

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

### **Выводы**

Использующиеся 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% от 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 является целесообразным.

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

При подготовке отчетной документации и протоколов измерений следует указывать измеренную величину с указанием погрешности измерения. В случае, если измеренная величина менее МДА, следует выполнять запись « $<$ МДА (МДА=XXX)». При суммировании данных, содержащих значения менее МДА, последние следует обнулять, т.к. вероятность их определения слишком мала. При этом сумму активностей возможно 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 НИИ РЗ, выполняется пересмотр стандарта (методических указаний) по установлению контрольных уровней радиационных параметров. Автор был бы рад, если бы его соображения оказались полезными при пересмотре названного стандарта.

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. Системы управления качеством. Требования. ДСТУ ISO 9001:2009. – К.: Госпотребстандарт, 2009. – 36 с. – (Национальный стандарт Украины).
5. Системы экологического управления. Требования и рекомендации по применению. ДСТУ ISO 14001:2006. – К.: Госпотребстандарт, 2006. – 27 с. – (Национальный стандарт Украины).

6. Руководство по статистическим методам применительно к ISO 9001:2000. ДСТУ ISO 10017:2005. – К.: Госпотребстандарт, 2005. – 33 с. – (Национальный стандарт Украины).
7. ДСТУ ISO 11462-1:2006. Статистический контроль. Руководство по внедрению статистического контроля процессов (СКП). Часть 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. Міністерство охорони здоров'я, Наказ "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" від 08.05.2008 N 240.
14. Методические указания МУК 4.3.2503-09. Стронций-90. Определение удельной активности в пищевых продуктах.
15. Антропова Н.С. Характеристики точности измерений активности на сцинтилляционном 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.-П., 1999. – 135 с.
18. ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 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.

### **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 МДА.*

### **V.V. Turbaevsky**

#### **IMPROVING THE SYSTEM OF RADIATION PARAMETERS CONTROL LEVELS FOR NUCLEAR POWER PLANT**

*A new approach to the establishment of supervisory and administrative and technological levels for characterize the state of radiation safety of NPPs is presented. A new approach to the preparation of the report documentation in the cases of providing measurement data are close to the minimum-detectable values is also proposed.*