

**НАЗНАЧЕНИЕ ПОРОГОВЫХ УСТАВОК В КАНАЛАХ КОНТРОЛЯ ПОДКРИТИЧНОСТИ
ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

Показано, что в действующем технологическом регламенте объекта «Укрытие» фактически отсутствуют методические указания по выбору допустимых значений в каналах контроля ядерно-физических параметров топливосодержащих материалов. Приведенные в регламенте пороговые уставки для плотности потока нейтронов даны без должного обоснования и не обеспечивают высокой эффективности контроля уровня подкритичности. Указано на необходимость разработки и включения в регламент удобной для практического использования методики определения пороговых уставок на основе компромисса между строгой научностью и простотой применения. Даны рекомендации по такой методике. Приведены основные принципы назначения пороговых уставок, влияющих на эффективность контроля ядерной безопасности объекта «Укрытие».

Ключевые слова: объект «Укрытие», топливосодержащие материалы, контроль ядерной безопасности, контрольные уровни.

Выбор пороговых значений в каналах контроля подкритичности топливосодержащих материалов (ТСМ) является важной задачей обеспечения ядерной безопасности объекта «Укрытие». Несмотря на большое внимание к этому вопросу, до настоящего времени фактически отсутствует приемлемая для практики методика назначения пороговых уставок в каналах контроля нейтронной активности.

В первых редакциях регламента объекта «Укрытие» [1] эта методика была слишком сложной для практического использования. Например, в регламенте 1997 г. устанавливались четыре уровня: «Внимание», «Опасно», «Авария», «СЦР», соответственно при кратности увеличении показаний нейтронных каналов >2 , >3 , >10 , >30 . При этом учитывались изменения плотности потока нейтронов (ППН), мощности экспозиционной дозы (МЭД), период нарастания ППН и др. Эта методика не выдержала проверки практикой, поскольку имела много неопределенностей при конкретных расчетах.

В более поздних редакциях регламента (2010 г.) она была заменена на предельно упрощенную методику выбора контрольных уровней с учетом максимальных показаний за предыдущий год. В последней редакции регламента (2011 г.) такая методика совсем отсутствует, а приведена только таблица с контрольными уровнями без обоснования их выбора [2]. В этом регламенте вообще нет упоминания о ядерной безопасности. Ничего не говорится и об уровне подкритичности ТСМ как основного показателя ядерной безопасности. Можно понять авторов регламента - уйти от необходимости оценки подкритичности. Тем не менее назначаемые в регламенте контрольные уставки на ППН и МЭД должны определяться именно с учетом непревышения опасных уровней подкритичности ТСМ.

Следует также отметить, что во всех регламентах не было четко оговорено, какие показания использовать для расчетов. Не указывался временной интервал осреднения результатов измерений при сравнении их с пороговыми уставками. Поэтому для действующих регламентных систем «Сигнал» и «Финиш-Р» получается разный подход при определении пороговых значений. Например, в системе «Финиш-Р» за результат измерения принимается среднее значение за сеанс (10 мин), а в СК «Сигнал» показания датчиков автоматически сравниваются с контрольными уставками каждые 10 с.

В задачах обеспечения ядерной безопасности целесообразно разделить задачи контроля статистической устойчивости процесса (это изменения в диапазоне «Нормально» - «Внимание») и задачу реагирования, т. е. вмешательства при опасном отклонении контролируемого параметра [4]. Если первую задачу можно почти полностью возложить на сигнальную автоматику, то вторая задача требует обязательного участия персонала. Контрольные уровни в каналах ППН - это «уровни вмешательства», когда должны приниматься ответственные решения о воздействии на систему с целью предотвращения СЦР и уменьшения ее последствий. Для таких решений показания ППН в каналах контроля ядерной безопасности ТСМ, согласно [1, 3, 5], должны увеличиться более чем в 10 раз. Естественно, в обеих задачах необходимо учитывать параметры распределения контролируемых случайных величин и вводить разумный запас на возможные погрешности и ошибки.

Показания в каналах контроля ППН являются случайной величиной. На рис. 1 приведен фрагмент динамики показаний ППН в СК «Сигнал» при регистрации каждые 10 с и при их осредне-

нии за 2 и 10 мин. Видно, что отклонения результатов контроля параметров ТСМ от среднегодовых и соответственно пороговые уровни могут сильно отличаться в зависимости от принятого интервала осреднения.

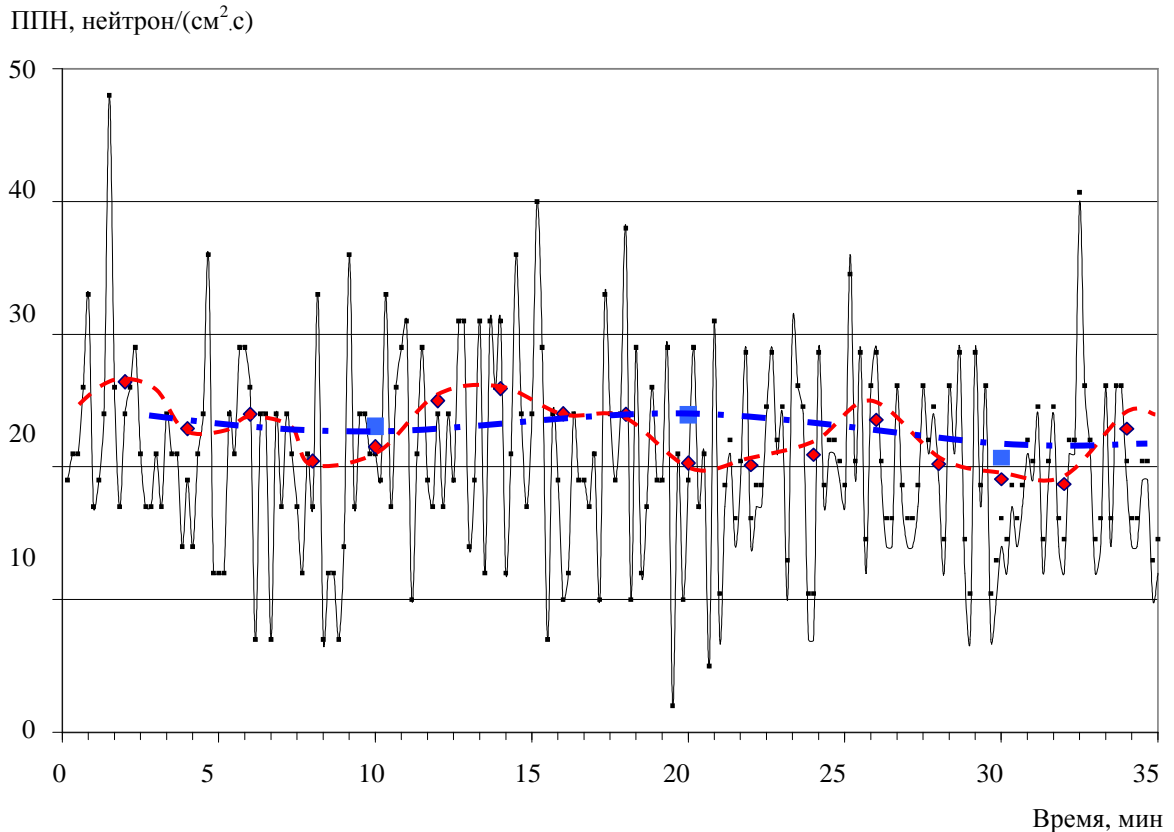


Рис. 1. Показания датчика потока нейтронов № 6 СК ТСМ «Сигнал» при регистрации через 10 с и при осреднении результатов за 2 и 10 мин:
 ◆ - осреднение за 2 мин; ■ - осреднение за 10 мин.

Конечно, нет необходимости и возможности анализировать каждое мгновенное значение и принимать решения каждые 10 с. За это время нереально выполнить необходимый объем действий по сигналу тревоги, а вероятность ложной тревоги и необоснованного вмешательства при этом очень велика. Для определения пороговых уровней надо выбирать рациональный интервал осреднения как с учетом гарантированной и своевременной аварийной сигнализации, так и с учетом уменьшения вероятности ложных тревог.

В корне неверно назначение контрольных уровней ядерной безопасности из условия выхода показаний в нейтронных каналах за интервалы 3σ . По сути это подмена задачи контроля безопасности задачей разбраковки. Такой подход может привести к абсурдным результатам. Например, для СК «Сигнал» с 10 - секундным циклом анализа показаний ППН (360 измерений в час), уставка 3σ с доверительной вероятностью 0,99 будет «гарантировать» в среднем каждый час не менее двух сигналов «Авария» на эвакуацию персонала. К тому же в [6] показано, что распределение показаний в каналах ППН СК «Сигнал» существенно отличается от нормального закона. Поэтому использование соответствующих таблиц для доверительных интервалов может привести к еще более «плачевным» результатам.

Разработка методики определения контрольных уровней в каналах контроля нейтронной активности ТСМ – это поиск компромисса между научной строгостью и рациональной простотой для практического использования. Следует также учитывать, что цена ошибок сильно зависит от уровня опасности. Например, последствия вмешательства при ложном сигнале тревоги для уровня «Внимание» и цена вмешательства при ложном сигнале «Авария» отличаются на порядки. Это надо учитывать при назначении контрольных уровней. При этом важнейшим требованием к системе контроля ядерной безопасности (СКЯБ) должно оставаться недопущение ошибки первого рода, когда система не среагирует на действительно опасное изменение подкритичности ТСМ.

Если на начальный момент периода (t_0) известны показания ППН канала (N_0) и уровень подкритичности ($K_{0эф}$) то при изменении подкритичности ($K_{tэф}$) показания канала (N_t) с достаточной для данной задачи точностью можно определить по формуле [3]

$$N_t = N_0 \cdot (1 - K_{0эф}) / (1 - K_{tэф}).$$

В качестве примера на рис. 2 показан характер зависимости уровня подкритичности ($K_{эф}$) от кратности увеличения показаний в каналах контроля ППН (N_t/N_0) при $K_{0эф} = 0,35$. Отсюда можно определить пороговые уставки для ППН ($N_{пор}$) для заданных предельных уровней подкритичности ($K_{п,эф}$). Например, для предельных значений $K_{эф}$ равных 0,9, 0,95 или 0,98, допустимые кратности увеличения показаний в каналах контроля ППН (N_t/N_0) в данном примере будут соответственно 6, 13 и 32.

Согласно [1, 3, 5] опасным состоянием, требующим безусловного вмешательства, является ситуация, когда $K_{эф} \geq 0,98$. Конечно, условие недопущения ошибки первого рода требует введения разумного запаса. В [3] предлагается в качестве предельного для порога «Внимание» использовать $K_{эф} = 0,90$, а для порога «Опасно» - $K_{эф} = 0,95$. Это вполне разумный запас, учитывая большую неопределенность в расчетах фактического уровня подкритичности.

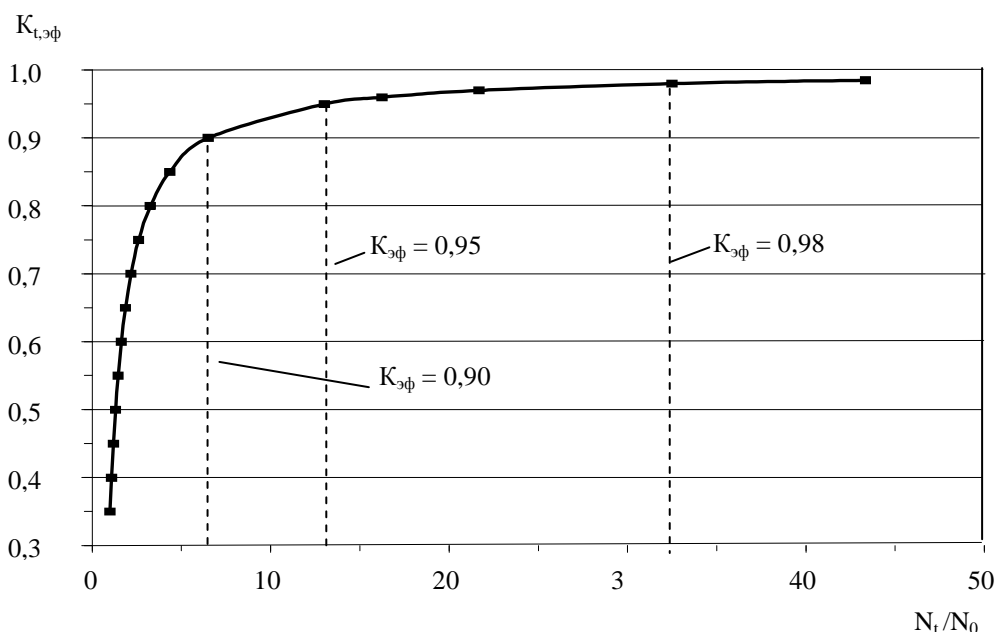


Рис. 2. Зависимость изменения уровня подкритичности ($K_{t,эф}$) от кратности увеличения показаний ППН.

Скопления ТСМ отличаются по удельному содержанию топлива, массе, влажности и другим параметрам, влияющим на уровень подкритичности, поэтому, строго говоря, для расчета пороговых уставок должны быть известны значения $K_{0эф}$ и N_0 на начальный момент периода (t_0) для каждого скопления ТСМ.

Проблема в том, что мы недостаточно знаем о фактических параметрах крупных скоплений ТСМ, которые, согласно регламенту, относятся к потенциально ядерно-опасным. В разных источниках приводятся разные цифры в зависимости от используемой методики расчета. Кроме того, текущее состояние ТСМ может изменяться при заливе водой, изменение объема, массы и других факторов, влияющих на подкритичность. Тем не менее с учетом консервативного подхода можно установить разумные пределы допустимого роста показаний в каналах контроля ППН. Тем более что в регламенте объекта «Укрытие» должны быть указаны конкретные значения контрольных уставок, без которых теряет смысл сам контроль подкритичности ТСМ.

Сейчас предполагается, что все ТСМ находятся в глубоко подкритичном состоянии. Многолетние измерения подтверждают стабильность состояния ТСМ, даже при сезонных колебаниях влажностно-температурных условий в помещениях объекта «Укрытие». При этом наблюдается общее постепенное уменьшение показаний ППН и МЭД в зонах контроля. При росте $K_{эф}$ до опасных уровней (0,9 - 0,95) показания ППН в каналах СКЯБ относительно начальных значений должны увеличи-

ваться в несколько раз. Опасный рост $K_{эф}$ связан фактически только с увлажнением ТСМ. В [5] показано, что на начальных этапах развития аномалий для ядерно-опасных скоплений ТСМ в помещениях объекта «Укрытие» время развития ситуации от «Нормально» до «Опасно» составляет несколько десятков часов. Такой длительный период развития подкритических аномалий позволяет персоналу выполнить все процедуры, связанные с обнаружением, идентификацией и подавлением опасных процессов.

В [1] для диапазона нормального состояния ТСМ устанавливалась допустимая кратность превышения текущих показаний ППН от среднегодового уровня не более двух. При этом указывалось, что для сигналов тревоги опасное превышение кратности должно регистрироваться одновременно в группе соседних по координатам каналов (не менее двух). Информационная надежность и достаточность получаемых данных о состоянии подкритичности ТСМ прежде всего зависит от места размещения нейтронных детекторов относительно контролируемых источников. При этом координаты размещения и количество информационных точек должны определяться исходя из требований взаимного перекрытия контролируемых массивов ТСМ, как минимум, тремя соседними детекторами нейтронного потока. Аналогичные рекомендации указаны и в других источниках [3, 5]. Такие допустимые превышения ППН можно сейчас взять за основу. При получении новых более точных сведений о состоянии ТСМ эти пороговые уставки можно будет скорректировать.

При достоверном увеличении среднесуточных показаний по каналам ППН более чем в два раза надо своевременно делать анализ возможных причин и продолжить оперативный контроль динамики показаний СКЯБ. Поэтому порог двукратного превышения показаний ППН (с учетом погрешности измерений), с одной стороны, гарантирует отсутствие ошибок первого рода (пропуска аварии) и в то же время позволяет уменьшить вероятность ложных сигналов тревоги.

Внедрение новой интегрированной автоматизированной системы контроля (ИАСК) с ее большими вычислительными возможностями позволит переложить на ЭВМ оперативный анализ результатов контроля динамики параметров ТСМ. В принципе это дает возможность выполнять анализ любой сложности, например отсеивать недостоверные, учитывать динамику периодов роста показаний, давать прогноз развития ситуации с оценкой ее вероятности, учитывать особенности контролируемых зон ТСМ и многое другое. Для этого надо провести соответствующую доработку программного обеспечения ИАСК. Важно, чтобы персонал, принимающий ответственные решения, получал достаточную и достоверную информацию в удобной для оперативного анализа форме.

Конечно, при анализе и принятии решений о необходимости вмешательства надо рассматривать не «мгновенные» показания ППН, а средние значения за определенный интервал. Этот интервал должен быть четко указан в регламенте. Он может меняться при изменении ситуации. Например, на интервале «Нормально» - «Внимание» достаточно делать вывод по изменению среднесуточных показаний в каналах ППН. На интервале «Внимание» - «Авария» делать анализ текущих среднечасовых показаний. Минимальным рекомендуется взять десятиминутный интервал, который принят в системах «Финиш-Р» и «Финиш». За базу анализа в каждом канале надо брать максимальные отклонения показаний от среднегодовых значений (N_0) за предыдущий год (с учетом отсева метрологических отказов).

Следует также отметить, что в первых редакциях регламента контрольные уровни «Внимание», «Опасно» и «Авария» для показаний ППН отличались в несколько раз [1]. В действующем регламенте для вмешательства в систему используют только два уровня - «Контрольный» и «Критический», которые отличаются всего на 20 %. При быстром развитии ситуации у персонала объекта «Укрытие» практически не будет достаточно времени для надежной оценки ситуации и оперативного принятия мер по подавлению СЦР, тем более что текущая ситуация сейчас оценивается дежурным персоналом по распечаткам СК «Финиш-Р» и «Сигнал» с интервалом в несколько часов.

Конечно, при опасном росте показаний в каналах контроля ППН в первую очередь необходимо выполнить экспертную процедуру, подтверждающую, что зафиксированные отклонения не вызваны метрологическими отказами. В частности, к метрологическим отказам должны быть отнесены все резкие отклонения показаний от устойчивого уровня.

В исследовательской системе «Финиш» такая оперативная оценка проводится на каждом цикле измерений автоматически по специальным алгоритмам, заложенным в программе. При опасной динамике анализ проводится также дежурным оператором. Опыт показывает, что все помехи вызывают характерные искажения сигналов от датчиков, приводящие к росту показаний ППН. Обычно по характеру динамики сигналов от датчиков можно с высокой достоверностью определить наличие помехи и причину аномальных показаний в канале.

К сожалению, в новой системе (ИАСК) такой оперативный анализ сигналов затруднен. Опыт показывает, что при включении на объекте «Укрытие» мощных энергоустановок из-за помех могут увеличиваться показания сразу в нескольких каналах контроля ППН. Это может привести к ложным тревогам. Поэтому надо, чтобы контроль ядерной безопасности объекта «Укрытие», помимо регламентной ИАСК, проводился также другой независимой системой, позволяющей оперативно выполнять анализ аномальных ситуаций и характера изменения сигналов от датчиков. Принципы создания такой резервной системы и ее взаимодействия с ИАСК изложены в [7].

Еще одна проблема, связанная с назначением контрольных уровней – это корректировка пороговых уставок после ремонта или замены датчиков, усилителей и других измерительных преобразователей в нейтронных каналах. Часто при таких операциях изменяется средняя скорость счета импульсов в канале (имп./с). Это приводит к изменению показаний ППН (нейтрон/(см² · с)), которые обычно определяются умножением скорости счета на соответствующий коэффициент пересчета.

Маловероятно, что в точке расположения датчика за время ремонта могут существенно измениться параметры нейтронных потоков. Конечно, если перед установкой канала и после ремонта очень корректно проведена метрологическая аттестация и коэффициент пересчета скорректирован с учетом всех факторов, то средние показания ППН в данном канале не должны существенно меняться. Однако на практике, учитывая специфику работы в тяжелых условиях объекта «Укрытие», это не всегда получается. Поэтому часто из-за изменения диапазона показаний ППН после ремонта возникает проблема и с оперативной корректировкой пороговых уставок.

Следует отметить, что основное назначение ИАСК – контроль подкритичности путем непрерывного наблюдения динамики нейтронной активности ТСМ. Для этого достаточно использовать только данные по динамике скорости счета от нейтронных детекторов, как это и было в первых модификациях систем «Финиш-Р» и «Сигнал». Пересчет средней частоты импульсов (имп./с) в показания ППН (нейтрон/(см² · с)) по сути, лишь вводит дополнительную погрешность, связанную с неопределенностью коэффициента пересчета. Поэтому после ремонта (до следующей плановой корректировки регламента) можно сохранить прежний диапазон показаний ППН на уровне, который был в данном канале до ремонта (соответственно изменив коэффициент пересчета). Главное, чтобы после ремонта была проведена калибровка канала и был правильно выбран порог дискриминации импульсов от датчика.

Заключение

В действующем технологическом регламенте объекта «Укрытие» отсутствуют методические указания по выбору пороговых значений в каналах контроля параметров ядерно-опасных скоплений ТСМ. Приведенные пороговые уставки для ППН даны без должного обоснования и не обеспечивают высокой эффективности контроля ядерной безопасности. Необходимо разработать удобную для практического использования методику определения пороговых уставок с учетом надежного контроля уровня подкритичности ядерно-опасных скоплений ТСМ.

Показаны основные принципы методики определения пороговых уставок в каналах ППН с учетом специфических условий объекта "Укрытие" и нового безопасного конфайнмента, которая позволит более эффективно и надежно контролировать уровень подкритичности ядерно-опасных скоплений ТСМ. Такая методика может быть или разделом регламента, или отдельным документом, на который должна быть ссылка в регламенте. В ней должны быть четко оговорены интервалы осреднения и анализа результатов измерений, а также алгоритмы эффективного отсеивания недостоверных показаний в каналах контроля ТСМ.

Рекомендуется ввести три контрольных уровня: «Внимание», «Опасно» и «Авария». Соответственно проводить анализ динамики среднесуточных, среднечасовых и десятиминутных показаний. При этом надо учитывать имеющиеся сведения о ядерно-опасных скоплениях ТСМ, расположении датчиков, параметрах распределения показаний ППН, а также других факторах, влияющих на качество контроля подкритичности.

Важно максимально сократить вред от ложных сигналов тревоги и нежелательного воздействия на систему путем введения разумного запаса с учетом возможной скорости изменения подкритичности и погрешностей измерений в каналах контроля ТСМ. Надо провести соответствующую доработку программного обеспечения ИАСК с целью отсеивания недостоверных показаний в каналах контроля, анализа динамики аномальных явлений и выполнения других задач повышения эффективности контроля ядерно-опасных ТСМ.

Для повышения надежности и достоверности анализа аномальных ситуаций необходимо, чтобы наряду с регламентной ИАСК учитывались также показания другой системы контроля ТСМ, позволяющей оперативно анализировать динамику сигналов от датчиков. Это особенно важно для ядерно-опасных зон, где количество датчиков ИАСК недостаточно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технологический* регламент объекта «Укрытие» реактора блока № 4 Чернобыльской АЭС. – Чернобыль, 1997.
2. *Технологический* регламент объекта «Укрытие» реактора блока № 4 Чернобыльской АЭС. 1Р-ОУ. – Чернобыль, 2011.
3. *Августов В. В., Кучмагра А. А., Молчанов О. С. и др.* Обоснование выбора пороговых значений контролируемых параметров системы контроля топливосодержащих материалов на объекте «Укрытие» // Проблемы Чернобиля. – 2000. – Вып. 6. – С. 140 - 152.
4. *Турбаевский В. В.* Совершенствование системы контрольных уровней радиационных параметров на атомных электростанциях // Ядерна та радіаційна безпека. - 2012. - № 1(53). - С. 21 - 27.
5. *Высотский Е. Д., Шевченко В.Г.* Методические основы контроля подкритичности топливосодержащих масс. - Чернобыль, 1998. - 23 с. – (Препр. / НАН України. МНТЦ «Уриття»; 98-1).
6. *Довидьков А. И., Скорбун А. Д.* Статистические свойства сигналов систем контроля нейтронной активности в объекте «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2013. – Вып. 20. - С. 77 - 84.
7. *Высотский Е. Д., Довидьков А. И., Краснов В. А., Щербин В. Н.* Особенности контроля ядерной безопасности объекта «Укрытие» в период сооружения нового безопасного конфайнмента // Там же. – 2011. – Вып. 17. - С. 91 - 97.

А. І. Довидьков, В. О. Краснов, В. М. Щербін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова 36а, Чорнобиль, 07270, Україна,

УСТАНОВЛЕННЯ ПОРОГОВИХ УСТАВОК У КАНАЛАХ КОНТРОЛЮ ПІДКРИТИЧНОСТІ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Показано, що в чинному технологічному регламенті об'єкта «Укриття» фактично відсутні методичні вказівки по вибору допустимих значень у каналах контролю ядерно-фізичних параметрів паливовмісних матеріалів. Наведені в регламенті порогові уставки для щільності потоку нейтронів дано без належного обґрунтування і вони не забезпечують високої ефективності контролю рівня підкритичності. Указано на необхідність розробки та включення до регламенту зручної для практичного використання методики визначення порогових уставок на основі компромісу між суворою науковістю і простотою застосування. Дано рекомендації по такій методиці. Наведено основні принципи призначення порогових уставок, що впливають на ефективність контролю ядерної безпеки об'єкта «Укриття».

Ключові слова: об'єкт «Укриття», паливовмісні матеріали, контроль ядерної безпеки, контрольні рівні.

A. I. Dovydkov, V. O. Krasnov, V. M. Shcherbin

Institute for safety problems of nuclear power plants of NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

PRINCIPLES OF THRESHOLD SETTING IN FUEL-CONTAINING MATERIALS SUBCRITICALITY CONTROL CHANNELS

It is shown that in current technological reglament of the "Ukryttya" object there is no guidance for permissible values selection in channels of fuel-containing materials nuclear-physical parameters control. Threshold settings for neutron flux density that were listed in the reglament are given without proper justification and do not provide a sufficient level of subcriticality control effectiveness. The necessity to develop convenient for practical using method for threshold settings determination on basis of compromise between strictly scientific approach and easy usage and to incorporate it to the reglament is pointed out. Recommendations for content of such a method are given. Main principles for threshold settings determination for the "Ukryttya" object nuclear safety control effectiveness are analyzed.

Keywords: "Ukryttya" object, fuel containing materials, nuclear safety control levels.

REFERENCES

1. *Technological* reglament for the "Shelter" object of Chernobyl NPP Unit 4 reactor. – Chernobyl, 1977. (Rus)
2. *Technological* reglament for the "Shelter" object of Chernobyl NPP Unit 4 reactor". 1P-ОУ. – Chernobyl, 2011. (Rus)
3. *Avustov V. V., Kuchmagra A. A., Molchanov O.S. et al.* Substantiation for choice of threshold values for controlled parameters of the "Ukryttya" object fuel containing materials control system // *Problemy Chornobylya*. – 2000. – Iss. 6. – P. 140 – 152. (Rus)
4. *Turbayevskii V. V.* Development of a system of radiation parameters level control for nuclear power plants // *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*. – 2012. – No. 1 (53). – P. 25 – 29. (Rus)
5. *Vysotskii E. D., Schevchenko V. G.* Methodical bases for control of fuel containing masses subcriticality. – Chernobyl, 1998. – 23 p. – (Prepr. / MNTC "Ukryttya"; 98-1). (Rus)
6. *Dovydkov A. I., Skorbun A. D.* Statistical properties of signals at neutron activity control system in the "Ukryttya" object // *Problemy bezpeky atomnyh electrostantsii i Chornobylya*. – 2013. – Iss. 20. - P. 77 - 84. (Rus)
7. *Vysotskii E. D., Dovydkov A. I., Krasnov, V. O., Shcherbin V. M.* Peculiarities of nuclear safety control of the "Ukryttya" object during New Safety Confinement construction // *ibid.* – 2011. – Iss. 17. - P. 91 - 97. (Rus)

Надійшла 09.09.2013
Received 09.09.2013