

**Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, В. А. Краснов, А. В. Михайлов,
Я. В. Наумчук, А. Е. Передерий, В. П. Силко***

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина
ГСП «Чернобыльская АЭС», ул. 77-й Гвардейской дивизии, 7/1, Славутич, 07100, Украина

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"

Представлена методика определения абсолютных значений плотности потока нейтронов по счетности в импульсных каналах штатной системы контроля ядерной безопасности объекта «Укрытие». Процедура расчета учитывает зависимость чувствительности детектора от жесткости энергетического спектра нейтронов (ход с жесткостью) в каждой точке контроля. Предложено обоснование количественных значений предупредительных и аварийных уставок безопасности, которые определяются текущими и среднегодовыми значениями плотности потока нейтронов.

Ключевые слова: измерительный канал, плотность потока нейтронов, методика, уставки безопасности, объект «Укрытие».

Введение

Ядерная безопасность объекта "Укрытие" обеспечивается контролем уровня подкритичности ($\delta K = 1 - K_{эф}$, $K_{эф}$ - эффективный коэффициент размножения нейтронов) скоплений топливосодержащих материалов (ТСМ), в объеме которых возможно образование условий для возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР).

Контроль уровня подкритичности осуществляется штатной системой контроля ядерной безопасности (СКЯБ) входящей в состав интегрированной автоматизированной системы контроля (ИАСК) объекта "Укрытие". Процедура контроля включает:

постоянное измерение плотности потока нейтронов (ППН) и мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения в 19 точках размещения блоков детектирования во внутренних помещениях объекта «Укрытие»;

раннее обнаружение и идентификацию нейтронных аномалий, связанных с изменением $K_{эф}$;

непрерывный контроль над динамикой развития обнаруженных нейтронных аномалий;

оповещение персонала объекта "Укрытие" в случае появления аномальных отклонений, превышающих аварийные значения, допускаемые условиями безопасной эксплуатации.

В настоящее время состояние всех контролируемых объектов стабильное и характеризуется неизменным значением $K_{эф}$ и фактически постоянными значениями ППН, отклонение которых от среднегодовых значений носит сезонный характер. В случае введения в ТСМ положительной реактивности с очень малой скоростью наиболее вероятным рассматривается сценарий постепенного, медленного нарастания ППН по мере роста $K_{эф}$. На начальных этапах развития аномалии скорость роста ППН будет соответствовать скорости введения реактивности. При этом период разгона (Т) будет составлять десятки часов, а при подходе к критическому состоянию Т будет уменьшаться до десятков минут. Подобная динамика была зарегистрирована при «повторной» критичности в помещении 305/2 (июнь 1990 г.) [1].

В связи с проектными требованиями к СКЯБ в части обязательной регистрации абсолютных значений ППН, с суммарной относительной погрешностью измерений не более 40 % предложена методика определения ППН по счетности в импульсных каналах (ИК) и адаптирована к условиям объекта "Укрытие" [2]. Методика была аттестована ННЦ «Институт метрологии» (Харьков) и применена для каналов, блоки детектирования которых установлены в точках контроля с оцененными характеристиками энергетического спектра нейтронов. Методика получения абсолютных значений ППН и результаты ее применения для СКЯБ ИАСК приведены ниже.

Определение ППН по счетности в ИК

Скорость счета (I) камеры деления (КД) в потоке нейтронов с энергетическим спектром F (E) определяется как

$$I = \eta < \sigma >^{235} \int_0^{00} F(E)dE, \quad (1)$$

© Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, В. А. Краснов,
А. В. Михайлов, Я. В. Наумчук, А. Е. Передерий, В. П. Силко, 2015

где η – экспериментальный коэффициент, зависящий от типа КД (массы и размещения активного слоя ^{235}U); $\langle \sigma \rangle^{235}$ – среднее по спектру $F(E)$ сечение деления ^{235}U ; $\int_0^{00} F(E)dE$ – ППН (Φ).

Тогда измеряемая в ИК ППН определяется как

$$\Phi = I / \eta \langle \sigma \rangle^{235} = kI, \quad (2)$$

где $\eta \langle \sigma \rangle^{235}$ – чувствительность КД, является функционалом от $F(E)$.

Таким образом, ППН является произведением регистрируемой скорости счета на величину (k), обратную чувствительности КД. Следовательно, корректное определение ППН по скорости счета измерительного канала (ИЗК) возможно только при известном спектре нейтронов в точке контроля с учетом уровня дискриминации. Чувствительность каждого канала зависит от индивидуальных характеристик энергетического спектра нейтронов в точках установки (КД).

Паспортная чувствительность КД определяется в типовом спектре тепловых нейтронов (в графитовой колонне). Для этого типа спектра величина счетного кадмиевого отношения $R_{cd} = 70$ при практически нулевом пороге дискриминации (R_{cd} – кадмиевое отношение, которое характеризует относительное уменьшение скорости счета при размещении КД в кадмиевом чехле). Поэтому для КД, работающих в условиях объекта "Укрытие", необходима индивидуальная оценка их чувствительности в каждой точке контроля.

Для объекта "Укрытие" фактически в любой доступной области реакторного пространства (РП) на значительном фоне гамма-излучения регистрируются нейтроны с различными характеристиками *промежуточного* энергетического спектра. Поэтому для исключения большой систематической ошибки при измерениях ППН была проведена индивидуальная оценка чувствительности детектора нейтронов в каждой из точек установки блоков детектирования (БД) СКЯБ. При оценке на основании подбора основных характеристик КД КНТ-31 и FC216/2000/ ^{235}U (табл. 1) и многолетней стабильности состояния контролируемых скоплений ЛТСМ были использованы:

результаты определения кадмиевых отношений (R_{cd}) по маршрутам доступа к точкам размещения БД [3];

зависимость эффективности (k) КД КНТ-31 с утеплителем от R_{cd} [4].

Зависимость $k = f(R_{cd})$ была получена путем расчетных модельных приближений и экспериментальной корректировки модельной кривой. Корректировка была проведена по результатам независимых измерений ППН на объекте "Укрытие" в контрольных точках с использованием твердых трековых детекторов и детекторов со съёмными борными фильтрами [4]. В любом случае чувствительность КД СКЯБ (FC216/2000/ ^{235}U) не больше, чем чувствительность КНТ-31 из-за менее эффективной геометрии размещения активного слоя ^{235}U .

Таблица 1. Сравнение КД КНТ-31 и FC216/2000/ ^{235}U

Тип КД	КНТ-31	FC216/2000/ ^{235}U
Паспортная чувствительность к тепловым нейтронам, имп/(н·см ²)	0,3	0,32
Масса ^{235}U , г	0,5	0,432
Площадь активного слоя, см ²	500	216
Плотность покрытия, мг/см ²	1,0	2,0
Толщина утеплителя, мм	15-18	23,5
Обогащение по ^{235}U , %	90	93

Согласно предложенной методике процедура определения эффективности детектора в точке контроля выполняется в следующей последовательности. На маршрутах доступа индивидуально для каждой точки (L1, L2...) возможного размещения блока детектирования (БД) определяются значения кадмиевого отношения (R_{cd1} , R_{cd2} ...) (рис. 1, а). На графике зависимости (рис. 1, б) определяются соответствующие значения коэффициента эффективности (k_1 , k_2 ...). Процедура определения k проводится на каждом маршруте доступа и/или при любом перемещении БД, если это приводит к изменению R_{cd} .

Для корректного определения счетности I , соответствующей «области нейтронных событий» в каждом ИК, были сняты амплитудные спектры и дискриминационные характеристики (рис. 2, б). На амплитудных спектрах каждого канала (рис. 2, а) были определены пороги дискриминации на уровне $\sim 0,3$ от максимальной амплитуды импульсов регистрации осколков деления. По дискриминационных характеристиках (рис. 2, б) были получены ожидаемые значения скорости счета в ИК.

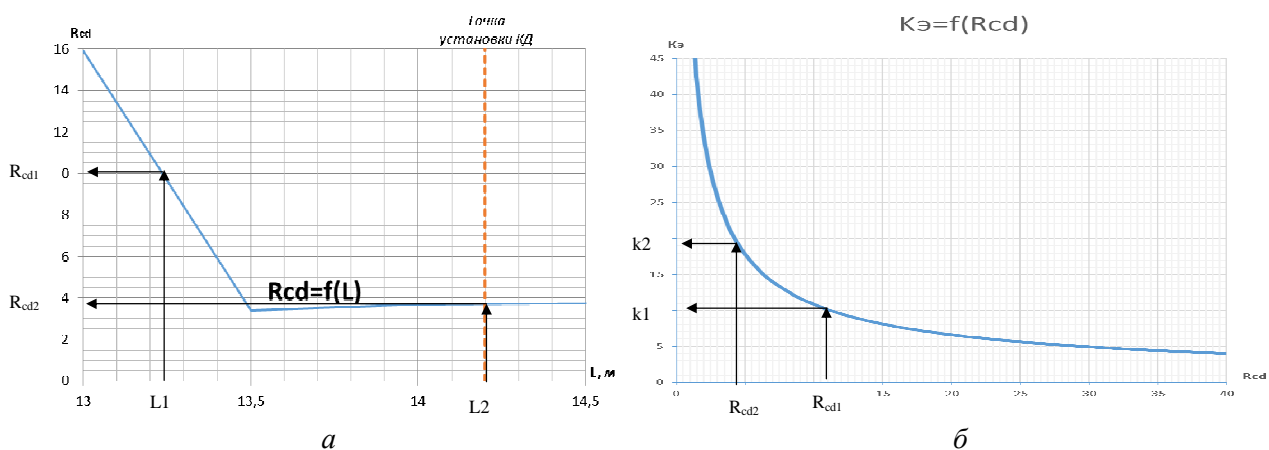


Рис. 1. Значения кадмиевого отношения и коэффициента эффективности: а - R_{cd} в точках возможного размещения детектора нейтронов; б - коэффициенты эффективности детектора от кадмиевого отношения.

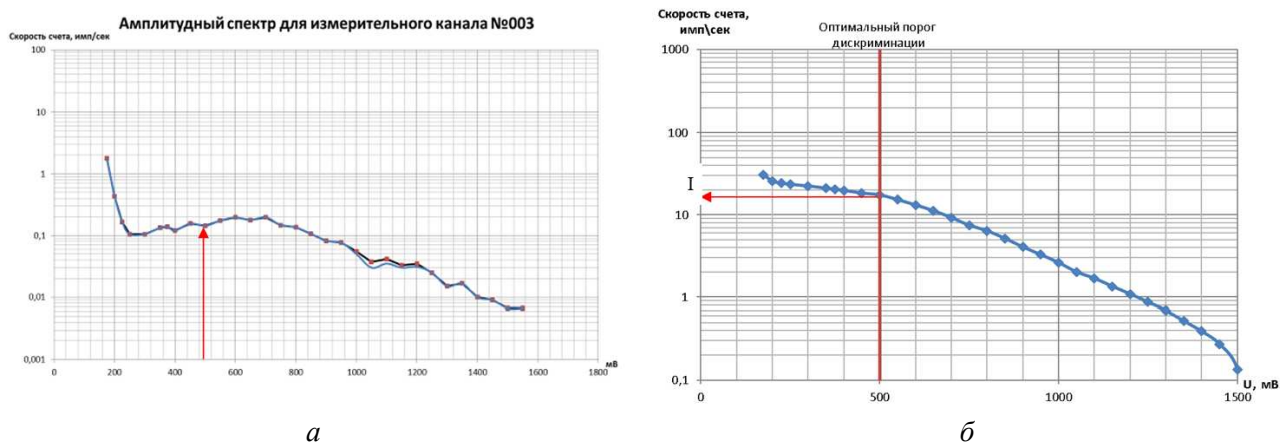


Рис. 2. Амплитудный спектр (а) и дискриминационная характеристика (б) для ИК № 03.

Пороги дискриминации в ИзК ППН СКЯБ, были введены установкой порогов дискриминации, обеспечивающих ожидаемую счетность.

Таблица 2. Расчетно-экспериментальные значения для ИК СКЯБ

Контролируемое помещение	Порог дискриминации, мВ	Скорость счета (I), имп/с	R_{cd}	Коэффициент эффективности	Расчетные ППН, н/(см ² ·с)	Уровень затухания, дБ	Скорость счета (I) ППН, имп/с	Значения ППН, н/(см ² ·с)
Пом. 305/2, юго-восточный сектор	400	10,1	3,3	24,5	258	14	10,6	260
	500	17,4	11,8	9,5	165	18	17,1	162
	450	5,2	3,7	21,8	113	13	5,1	111
	400	0,4	20	6,7	3	13	0,3	2
Пом. 305, юго-западный сектор	400	3,5	2,3	31,5	110	7	1,9	60
	500	0,04	18	7	0	13	0,001	0
	550	15	1,4	45	675	18	15,7	707
ПРК	450	0,05	10,4	10,7	1	13	0,001	0
	400	1	10	10,9	11	10	0,92	10
ЮБВ	400	5,5	2,3	31,5	173	14	5,9	186
	500	14	3,7	21,8	305	8	10,5	229
РП	550	26,7	2,5	29	774	18	24,8	719
	500	1,2	2,5	29	35	14	1,4	41
	400	1,9	8	12,8	24	9	1,2	15
	350	3,7	3,7	21,8	80	12	3	65
	300	1,9	2,5	29	55	9	1,8	52

В табл. 2 приведены расчетно-экспериментальные характеристики ИК СКЯБ, полученные на этапе метрологической поверки. Оценка значений ППН показывает, что нейтронная активность скоплений с 1990 г. фактически не изменилась.

Значения ППН (см. табл. 2), полученные по результатам метрологической поверки, находятся в пределах допустимой проектной погрешности измерений (до 40 %) [2]. Величина погрешности определения ППН в большей части обусловлена систематической ошибкой дискретного задания порога дискриминации уровнем затухания (коэффициент усиления в тракте нормализации импульсов с КД), минимальный шаг которого составляет 1 дБ.

Определение значений предупредительных и аварийных уставок (безопасности)

Для объекта контроля с низкообогащенной размножающей средой в критической композиции вероятность возникновения повторной критичности существует только при поступлении и удержании воды, т.е. возникновение СЦР, возможно только в процессе увлажнения при достижении оптимального водо-уранового отношения. При существующем недостатке информации о контролируемых объектах в скоплениях ТСМ, находящихся в потенциально опасных помещениях, допускается вероятность наличия или образования критической композиции и ее увлажнения. При этом ППН в контролируемом объекте определяется как

$$\varphi = \frac{S}{\Sigma_a \cdot (1 - K_{эф})}, \quad (3)$$

где S - мощность внутреннего источника нейтронов в скоплении (практически постоянный, так как падение скорости генерации нейтронов спонтанного деления от ^{244}Cm и плутония компенсируется ростом нейтронов (α, n)-реакций при накоплении ^{241}Am ; Σ_a - макроскопическое сечение поглощения размножающей среды (вариации незначительны); $K_{эф}$ - эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Поступление воды в «сухое» скопление ТСМ при достижении оптимального водно-уранового отношения приводит к росту $\Delta K_{эф} \approx 0,1$. Тогда, при допустимом значении $K_{эф} = 0,95$, кратность возрастания ППН φ относительно его первоначального значения φ_0 составит

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{1 - (K_{эф} - \Delta K_{эф})}{1 - K_{эф}} \leq 3, \quad (4)$$

При постоянной среде раздела «источник - детектор» и отсутствии значимой фоновой составляющей значение ППН утечки, регистрируемое детекторами, размещенными на периферии объекта контроля, будет возрастать с такой же кратностью.

С целью обнаружения недопустимого состояния подкритичности скоплений ТСМ ($K_{эф} > 0,95$) на текущее значение ППН вводится аварийная ($HH_{ППН}$) уставка. Превышение значения $HH_{ППН}$ классифицируется по международной шкале ядерных событий (INES) как событие 1 уровня – *аномальная ситуация, характеризующаяся выходом за допустимые пределы нормальной эксплуатации*.

Для раннего обнаружения устойчивой аномалии в регистрируемых значениях ППН вводится предупредительная уставка ($H_{ППН}$). Появление аномалии может быть обусловлено:

- изменением уровня подкритичности объекта контроля;
- изменением геометрии наблюдения и среды раздела «источник - детектор»;
- метрологическими отказами.

Превышение $H_{ППН}$ классифицируется по шкале INES как событие незначительное с точки зрения безопасности и характеризуется как отклонение в состоянии ядерноопасного объекта.

Устанавливаемое значение $H_{ППН}$ исключает вероятность:

- превышения ее значения в случае регистрации ППН с суммарной ошибкой, величина которой не выходит за границы проектной допустимой относительной погрешности + 40 % ($P = 0,95$);
- регистрации аномалии, вызванной наличием неустраняемой систематической погрешности, обусловленной сезонными изменениями температурно-влажностного режима объекта «Укрытие».

Методика определения абсолютных значений $HH_{ППН}$ и $H_{ППН}$ для каждого ИзК ППН основывается на результатах статистического анализа данных непрерывного контроля ППН в течение года. Для каждого ИзК рассчитываются следующие параметры:

- среднесуточные ($A_{срс}$), среднемесячные ($A_{срм}$) и среднегодовое ($A_{ср}$) значения за соответствующий временной интервал наблюдений;
- среднеквадратическое отклонение регистрируемого значения от среднего значения;
- верхняя граница диапазона регистрируемых значений относительно среднего при доверительной вероятности $p = 0,99$ (+ 3 σ).

По результатам статистической обработки анализируемого массива данных определяются максимальное среднеемесячное значение ($A_{срм}^{макс}$) и максимальное среднесуточное ($A_{срс}^{макс}$) значения ППН, рассчитанное для соответствующего календарного месяца. Значение $H_{ППН}$ определяется как

$$H_{ППН} = A_{срс}^{макс} \cdot 1,4, \quad (5)$$

Превышение значения $H_{ППН}$, обусловленное изменением $K_{эф}$, характеризуется коррелированным (в дублирующих каналах), монотонным ростом ППН с минимальным периодом удвоения от шести часов. Любое устойчивое превышение $H_{ППН}$ требует идентификации причин появления аномалии. Значение аварийной уставки ($HH_{ППН}$) определяется как

$$HH_{ППН} = A_{ср} \cdot 3, \quad (6)$$

где $A_{ср}$ - среднегодовое значение ППН.

МЭД гамма-излучения является сопутствующим параметром, который регистрируется СКЯБ, но не имеет прямого отношения к процедуре оценки состояния уровня подкритичности объекта контроля. К тому же МЭД практически полностью определяется гамма-излучением ^{137}Cs , на фоне которого вклад гамма-квантов распада осколков деления фактически не проявляется в заданных диапазонах обнаружения подкритической аномалии. Однако регистрация значений МЭД позволяет осуществлять непрерывный контроль над постоянством местоположения объекта контроля (источника излучения) относительно детектора и идентифицировать метрологические отказы в работе ИзК, которые могут быть также результатом линейных и угловых перемещений детекторов относительно источника. По каждому ИзК МЭД задается уставка ($H_{МЭД}$), исключая вероятность обнаружения аномалий, которые не выходят за границы проектной допустимой погрешности измерений

$$H_{МЭД} = G_{ср} \cdot 1,4, \quad (7)$$

где $G_{ср}$ - среднегодовое значение МЭД. В аварийном диапазоне критичности $K_{эф}$ (при достижении значения $K_{эф} \geq 1$) можно ожидать двух-трехкратное превышение показаний МЭД над средним значением гамма-фона, зарегистрированным за предыдущий период наблюдений. При таких условиях регистрация показаний МЭД позволяет оперативно подтвердить возникновение СЦР.

Заключение

Внедрение методики определения текущих значений ППН по счетности в ИК с учетом индивидуальных характеристик энергетического спектра в точках размещения БД ИК СКЯБ дают возможность:

- проводить плановые метрологические поверки методом компаратора без извлечения БД с мест размещения;
- анализировать реальную динамику долговременной нейтронной активности и получать консервативную оценку текущей подкритичности контролируемых скоплений ТСМ;
- разработать критерии обнаружения и идентификации нейтронных аномалий;
- оценить эффективность сети размещения точек контроля и вывести в резерв неинформативные каналы;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Высотский Е. Д., Ключников А. А., Щербин В. Н., Шостак В. Б.* Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2009. – Вип. 12. – С. 93 – 102.
2. *Метрология.* Интегрированная автоматизированная система контроля. Система контроля ядерной безопасности. МПУ 12-202:2013. - Харьков, 2013.
3. *Арзуманов С. С., Беляев С. Т., Бондаренко Л. Н. и др.* Нейтронные исследования на объекте «Укрытие» (Аварийный 4-й энергоблок ЧАЭС) // Препринт РНЦ «Курчатовский институт»; ИАЭ-5313/3. - М. 1991.
4. *Арзуманов С. С., Беляев С. Т., Бондаренко Л. Н. и др.* Исследовательская система нейтронного контроля ядерно-физического состояния топливосодержащих масс 4-го блока ЧАЭС (Аварийный 4-й энергоблок ЧАЭС) // Препринт РНЦ «Курчатовский институт»; ИАЭ – 5452/3. - М. 1992.

**С. Д. Висотський, Р. Л. Годун, А. О. Дорошенко, В. О. Краснов, О. В. Михайлов,
Я. В. Наумчук, А. Ю. Передерій, В. П. Сілко***

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна
ДСП «Чорнобильська АЕС», вул. 77-ї Гвардійської дивізії, 7/1, Славутич, 07100, Україна

МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ЩІЛЬНОСТІ ПОТОКУ НЕЙТРОНІВ У СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ"

Представлено методику визначення абсолютних значень щільності потоку нейтронів по швидкості рахунку в імпульсних каналах штатної системи контролю ядерної безпеки об'єкта «Укриття». Процедура розрахунку враховує залежність чутливості детектора від жорсткості енергетичного спектра нейтронів (хід із жорсткістю) у кожній точці контролю. Запропоновано обґрунтування кількісних значень попереджувальних та аварійних уставок безпеки, що визначаються поточними та середньорічними значеннями щільності потоку нейтронів.

Ключові слова: вимірювальний канал, щільність потоку нейтронів, методика, уставки безпеки, об'єкт «Укриття».

**Ye. D. Vysotskij, R. L. Godun, A. O. Doroshenko, V. O. Krasnov, O. V. Mikhailov,
Ya. V. Naumchuk, A. Ye. Perederiy, V. P. Silko***

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine
SSE "Chernobyl NPP", 77th Guards Division str., 7/1, Slavutich, 07100, Ukraine

THE METHODOLOGICAL SUPPORT OF NEUTRON FLUX DENSITY MEASUREMENTS OF NUCLEAR SAFETY CONTROL SYSTEM OF "UKRYTTYA"

The article represents a methodology of neutron flux density absolute values determining by countability in impulse channels of nominal nuclear safety control system of "Ukryttya". The procedure for calculating takes into account the dependence of detector sensitivity on rigidity of the neutron energy spectrum (movement with stiffness) at each control point. Also there is a substantiation of the quantitative values of warning and alarm setpoints of security, which are determined by current and annual average values of the neutron flux density.

Keywords: measuring channel, the neutron flux density, methodology, setpoints of security, the "Ukryttya" object.

REFERENCES

1. *Vysotskij Ye.D., Kliuchnykov O.O., Shcherbin V.N., Shostak V.B.* Neutron and physical characteristics of nuclear-dangerous accumulation of fuel containing materials // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2009. - Iss. 12. – P. 93 - 102. (Rus)
2. *Metrology.* The integrated automated control system. The control system of nuclear safety. – LCP 12-202:2013. – Kharkiv, 2013. (Rus)
3. *Arzumanov S.S., Belyaev S.T., Bondarenko L.N. et al.* Neutron Investigations of the object "Shelter" (the ruined unit 4 of ChNPP) // Preprint of RRC "Kurchatov Institute"; 5313/3. – Moskva, 1991. (Rus)
4. *Arzumanov S.S., Belyaev S.T., Bondarenko L.N. et al.* The reseach system of neutron control of the nuclear and physical state of fuel-containing masses of Chernobyl' 4th unit (the ruined unit 4 of ChNPP) // Preprint of RRC "Kurchatov Institute"; 5452/3. – Moskva, 1992. (Rus)

Надійшла 11.03.2015
Received 11.03.2015