

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХ ТИПОВ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫБОРОЧНОЙ ПРОВЕРКИ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**О.В. Кривошеина**

*Московский государственный инженерно-физический институт  
(технический университет), г. Москва*



В статье рассмотрена методология выборочной проверки ядерных материалов с использованием двух типов неразрушающего анализа – качественного и количественного определения ядерного материала. Совместное использование приборов существенно уменьшает затраты на проверку и позволяет решать задачи обнаружения хищения различного количества ядерного материала из учетной единицы. Предложен новый метод расчета размера выборки – с помощью диаграмм.

Одной из приоритетных задач Госатомнадзора России является надзор за системой государственного учета и контроля ядерных материалов, осуществляемый посредством инспекций на поднадзорных установках. Инспекции систем учета и контроля ядерных материалов основываются на проверке

- организации системы учета и контроля;
- учетной и отчетной документации;
- применения средств контроля доступа к ядерным материалам;
- качества измерительных систем, применяемых оператором для контроля ядерных материалов;

- наличия ядерных материалов путем проведения измерений [1].

Проведение надзорным органом независимых измерений ядерных материалов является одним из основных инструментов обеспечения достоверности получаемой информации и помогает объективно оценить эффективность системы учета и контроля ядерных материалов в эксплуатирующей организации и ее соответствие требованиям нормативной документации.

Для проведения подтверждающих измерений фактически наличного ядерного материала инспекторами Госатомнадзора используются приборы неразрушающего контроля. В последнее время методы неразрушающего анализа стали важным аналитическим средством при проведении измерений для систем контроля и учета ядерных материалов; они являются более быстрыми, дешевыми и доступными, чем разрушающие химические методы, требуют меньшей подготовки персонала, проводящего измерения, не производят каких-либо значительных изменений в состоянии исследуемого материала, исключают потери самого материала и не создают радиоактивных отходов. Более того, определенные виды ядерного материала (отходы в контейнерах, свежие топливные сборки реакторов и т.п.) можно измерить только с помощью приборов неразрушающего контроля.

В настоящее время отделы инспекций Госатомнадзора России и многие предприятия Минатома оснащены приборами неразрушающего контроля ядерных материалов – гамма-спектрометрами и счетчиками нейтронных совпадений. Но для успешного выполнения задач измерений необходимо решение некоторых проблем методического, технического и организационного характера.

На сегодняшний момент в России отсутствуют документы федерального уровня, устанавливающие единую систему требований норм и правил в области учета и контроля ядерных материалов, включая измерения ядерных материалов; идет процесс разработки нормативной базы. Однако необходимо несколько лет для ее превращения в строгую иерархическую систему законов, федеральных нормативов, регулирующих и руководящих документов различного уровня, которые будут определять требования и порядок функционирования всех звеньев системы государственного учета и контроля ядерных материалов на всех уровнях.

При малых количествах проверяемых учетных единиц (УЕ) с ядерным материалом измерениям подвергаются, как правило, все учетные единицы партии ядерного материала. Когда же количество заявленных единиц превышает десятки, сотни и тысячи штук, измерение всех ядерных материалов затруднено по соображениям временного и экономического характера. Поэтому при инспекторских проверках ядерных материалов должны применяться методы выборочной проверки с использованием принятых пороговых количеств и уровня доверительной вероятности.

С учетом актуальности проблемы, связанной с организацией проведения подтверждающих измерений, возникла необходимость проведения дополнительных исследований и создания на основе анализа существующей и предполагаемой систем учета и контроля ядерных материалов эффективных методических рекомендаций по организации инспекций с использованием приборов неразрушающего анализа.

В настоящее время Госатомнадзором России проводится анализ подхода к выборке измеряемых ядерных материалов с учетом опыта Министерства энергетики США, МАГАТЭ, имеющих большую практику применения неразрушающих методов контроля. Данный анализ необходим для нахождения оптимального решения задач инспектора Госатомнадзора России при проведении измерений ядерных материалов в соответствии со спецификой имеющихся приборов, аттестованных методик, специализацией поднадзорных организаций, а также будет полезен и самим организациям при выполнении подтверждающих измерений.

В соответствии с практикой министерства энергетики США и МАГАТЭ инспекционная деятельность при проведении инспекции подразделяется на два типа: проверка атрибутов и проверка переменных.

При проверке атрибутов главной целью является обнаружение «дефекта», равного одному из количественных критериев принятия/непринятия данных, представленных персоналом установки. С точки зрения инспектора «дефектом» является существенное несовпадение данных измеряемой УЕ с данными, представленными персоналом установки. Независимые измерения инспектора, проводимые по принципу «да-нет», носят качественный характер и не требуют применения точных методов измерения. Результатом этих измерений является качественное заключение инспектора о принятии или непринятии с известной вероятностью полученных данных, представленных персоналом установки.

Результатом проверки переменных является количественное заключение инспектора надзорного органа относительно принятия/непринятия данных, заявленных персоналом установки с известной вероятностью и ошибкой измерений [2].

В первую очередь при проверке атрибутов определяется пороговое количество  $G$  ядерного материала, которое было изъято из партии учетных единиц последствием од-

ного или более хищений (изъятий) из каждой единицы. Учетная единица, как имеющая атрибут дефекта или без дефекта, определяет большое хищение [3]. Для пояснения задачи обозначим через  $N$  общее число учетных единиц в некоторой конечной исследуемой совокупности (партии) и положим, что  $D$  из них обладают некоторыми свойствами, которые отличаются от свойств остальных учетных единиц этой совокупности. В дальнейшем учетные единицы  $D$  рассматриваются как «дефекты». Нашей задачей является обнаружение с заданной вероятностью количества дефектов  $D$  в исследуемой совокупности. План выборки по атрибутам имеет высокую вероятность (больше или = 90%) определения хотя бы одного дефекта, когда число дефектов таково, что полное количество изъятого из совокупности, есть  $G$ . Размер выборки определяется количеством  $G$ , количеством ядерного материала в учетной единице и риском неопределения хотя бы 1 дефекта в выборке.

Примем следующие обозначения:

$n$  – размер выборки,

$N$  – общее количество единиц в совокупности,

$\beta$  – вероятность неопределения хотя бы 1 дефекта (из  $D$ ) в выборке,

$d = G/A$  – число контейнеров, необходимое для получения количества  $G$ ,

$G$  – пороговое количество ядерного материала,

$A$  – масса U-235 в каждом контейнере.

В соответствии с гипергеометрическим распределением, определяющим размер выборки из совокупности учетных единиц без повтора,

$$n = \frac{1}{2} (2N - d + 1) (1 - \beta^{1/d}). \quad (1)$$

Часто это замещается приближением

$$n = N (1 - \beta^{1/d}), \quad (2)$$

основанным на биномиальном распределении. Этот размер выборки больше, чем основанный на гипергеометрическом распределении [3].

Данный подход предполагает определение только больших дефектов, сравнимых с  $G$  или массой U-235 (или Pu) в учетной единице.

Для нахождения малых дефектов в учетной единице (сравнимых с чувствительностью прибора) предположим, что  $d = G/\gamma A$  – число контейнеров, необходимое для получения количества  $G$  ядерного материала изъятием из каждого контейнера  $\gamma A$  ( $\gamma$  – доля изъятая из каждого контейнера);  $\gamma=1$  для больших дефектов и  $\gamma=\gamma_0$  для малых дефектов, где  $\gamma_0$  определена чувствительностью прибора.

Количество  $A$  в учетной единице играет важную роль при вычислении размера выборки. Рекомендуется брать  $A$  как среднее количество ядерного материала для всех учетных единиц с допуском  $\pm 25\%$  от среднего [4].

Использование подобного подхода ( $\gamma=\gamma_0$ ) предполагает определение только малых дефектов; количество попавших в выборку учетных единиц (для определения малых дефектов) недостаточно для нахождения больших дефектов.

Задача инспектора при разработке плана проверки – достичь желаемого значения  $\beta$  для широкого диапазона значений  $\gamma A$ , т.е. как нахождение больших ( $\gamma=1$ ), так и малых дефектов ( $\gamma=\gamma_0$ ). Для достижения поставленной задачи в данной работе предлагается взаимодополняющее использование обоих типов проверки; при этом предполагается использование приборов двух типов – качественного и количественного характера. Применение приборов двух типов целесообразно, т.к. количество измерений для качественного определения типа ядерного материала совсем необязательно выполнять точным прибором. Для решения атрибутивной задачи (да-нет) можно использовать приборы, определяющие только наличие или отсутствие ядерного материала в учетной еди-

нице, а для количественной оценки измерения использовать приборы с заданной погрешностью измерения. Использование приборов двух типов существенно сокращает затраты на проведение инспекции, т.к. время измерения одной учетной единицы прибором качественного характера обычно в 3 раза меньше времени измерения прибором количественного характера.

Обозначим через  $n_1$  - число учетных единиц, которое измеряется прибором качественного определения типа ядерного материала (метод 1);  $n_2$  - число учетных единиц, которое измеряется прибором количественного определения изотопного состава (количества) ядерного материала (метод 2).

Рассмотрим план выборки, при котором общий размер выборок  $n_1 + n_2 = n_a$  выбирается при использовании атрибутивной формулы для  $n_a$  для желаемого значения и для наименьшего числа дефектов, дающих возможность получить целевое количество общего изъята. Другими словами, мы рассчитываем по формуле (1) или (2)

$$n_a = \frac{1}{2} (2N - d + 1) (1 - \beta^{1/d})$$

или

$$n_a = N (1 - \beta^{1/d})$$

Таким образом, сначала рассчитаем значение  $n_a$ , а затем  $n_2$ , которое, в свою очередь, используется для расчета  $n_1$ , т.к.  $n_1 = n_a - n_2$ .

Инспектор выбирает  $n_2$  таким образом, чтобы  $\beta$  достигалось для широкого диапазона значений  $\gamma_2 A$ . Атрибутивный размер выборки  $n_a$  рассчитывается при использовании  $d$  и  $\beta$ . При данном подходе инспектору необходимо, чтобы  $\beta$  обязательно достигалось в соответствии с  $\gamma_2 A$ . Метод, который мы обсуждаем при данном подходе, не является очень эффективным для поддержания  $n_2$  на возможно минимальном уровне. Это происходит по причине того, что мы рассчитываем  $n_2$  таким образом, как если бы измерения, сделанные по методу 1, не приносили никакого вклада в вероятность обнаружения при  $\gamma_2 A$ . Этим можно или нельзя пренебрегать в зависимости от того, насколько существенно влияние со стороны метода 1 [5]. В соответствии со спецификой приборов, используемых в практике инспекторской деятельности, допускаем, что приборы качественного характера, выполняющие измерения методом 1, не вносят никакого вклада в вероятность обнаружения при нахождении дефектов  $\gamma_2 A$ .

В нашем случае, когда  $\gamma_2 A$  является дефектом атрибутивного размера для метода 2, используем атрибутивную формулу во второй раз, чтобы рассчитать значение  $n_2$ :

$$n_2 = \frac{1}{2} (2N - r + 1) (1 - \beta^{1/d^2}) \quad (3)$$

или

$$n_2 = N (1 - \beta^{1/d^2}) \quad (4)$$

где  $d_2 = G/\gamma_2 A$ , а  $\gamma_2 = 4\delta$ , ( $\delta$  - суммарная относительная погрешность методики измерения [6]).

Предполагается, что измерения методом 2 окажутся несколько более дорогостоящими по сравнению с методом 1. По этой причине ищем такие значения размеров  $n_1$  и  $n_2$ , чтобы значение  $\beta$  достигалось во всем диапазоне значений  $\gamma A$ , при этом значение  $n_2$  выбирается насколько возможно малым.

В настоящее время для выборочной проверки совокупности учетных единиц используется только один прибор. Подход к выборочной проверке, изложенный выше, предлагает не только нахождение крупных и мелких дефектов, но и существенно сокращает затраты на проверку учетных единиц с ядерным материалом.

Например, мы имеем совокупность из 100 учетных единиц с высокообогащенным

ураном при массе U-235 в одной учетной единице -1 кг. Предполагается использование одного прибора количественного характера с  $\delta = 3\%$  и временем измерения 1000 с. Размер выборки при расчете по атрибутивной формуле (без учета погрешности прибора)

$$n = 100 (1 - 0,05^{1/8}) = 31,2 \approx 31 \text{ учетная единица.}$$

Время измерения всех учетных единиц  $T_0 = 31000 \text{ с} = 516 \text{ мин.}$

Проведем проверку той же совокупности учетных единиц двумя приборами – качественного определения материала и прибора с  $\delta = 3\%$ . Общий размер выборки остался неизменным

$$n_0 = 100 (1 - 0,05^{1/8}) = 31,2 \approx 31 \text{ учетная единица.}$$

Размер выборки при учетывании погрешности прибора  $\delta = 3\%$  составил

$$n_2 = 100 (1 - 0,05^{1/67}) = 4,3 \approx 5 \text{ учетных единиц.}$$

Размер выборки для измерения качественным прибором

$$n_1 = 31 - 5 = 26 \text{ учетных единиц.}$$

В соответствии с общепринятой практикой время измерения прибором качественного характера 100-300 с, для нашего случая примем 180 с.

$$T_1 = 26 \cdot 180 = 4680 \text{ с} = 78 \text{ мин.}$$

$$T_2 = 5 \cdot 1000 = 5000 \text{ с} = 83 \text{ мин.}$$

$$T_0 = 78 + 83 = 161 \text{ мин.}$$

Или при одновременном использовании обоих приборов

$$T_0 = 83 \text{ мин.}$$

Таким образом, рассмотрев оба случая, мы можем сделать вывод, что использование двух приборов существенно уменьшает затраты на проведение инспекции. Так, в первом случае мы затратили на проведение измерений 516 минут, а во втором - 161 минут при использовании двух приборов последовательно или 83 минут при использовании двух приборов параллельно.

Для наглядности определения диапазона обнаружения дефектов построим зависимости вероятности обнаружения от количества дефектов, используя выше полученные результаты (рис.1).

Из рис. 1 видно, что при данном подходе (использовании двух приборов – качественного определения материала ( $n=26$ ) и прибора с  $\delta = 3\%$  ( $n=5$ )) существует уязвимая область обнаружения дефектов (средняя область), что соответствует выявлению третьего вида дефекта – частичного дефекта. Вероятность обнаружения дефектов в дан-



Рис. 1. Вероятность обнаружения при использовании двух приборов – качественного определения материала ( $n=26$ ) и прибора с  $\delta = 3\%$  ( $n=5$ )

ной области снижается до 0,65, а затем опять возрастает при увеличении числа дефектных единиц. Для решения проблемы в нашем случае можно предложить два варианта:

- использование для проверки совокупности учетных единиц третьего прибора с погрешностью измерения 7-10% (для обнаружения частичных дефектов),
- снижение вероятности обнаружения дефектов при проверке для получения единой вероятности обнаружения для всего диапазона предполагаемых дефектов.

Каждый из этих вариантов имеет свои преимущества и недостатки, зависящие от целей проверки, наличия приборной базы, временных ресурсов и т.д., и требует отдельного рассмотрения.

Дополнительно для расчета размера выборки в данной работе предлагается использовать диаграммы (рис.2). На рис. 2 показаны зависимости коэффициента выборки  $K$  от массы U-235 A в учетной единице. Коэффициенты были рассчитаны в соответствии с формулами (2),(4) при вероятности обнаружения 0,95. Зависимость 1 на рисунке получена с помощью формулы  $K=1-\beta^{1/d}$ , зависимости 2,3 - с использованием в формулах погрешности методики измерения -  $K=1-\beta^{1/d^2}$ , где  $d_2 = G/4\delta A$ . Конечный результат – размер выборки рассчитывается как  $n = NK$ , где  $N$  - число учетных единиц в проверяемой совокупности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для целей надзора за учетом и контролем ядерных материалов в работе предложены методы расчета размеров выборки при проверках совокупностей учетных единиц с ядерным материалом с использованием приборов двух типов в зависимости от переключения ядерного материала (определение «больших», «частичных» и «малых» дефектов).

Проведенные исследования показывают, что использование двух типов приборов неразрушающего контроля существенно уменьшает затраты на проведение проверки (в первую очередь временные). Привлекательность полученных результатов позволяет продолжить исследования в этом направлении.

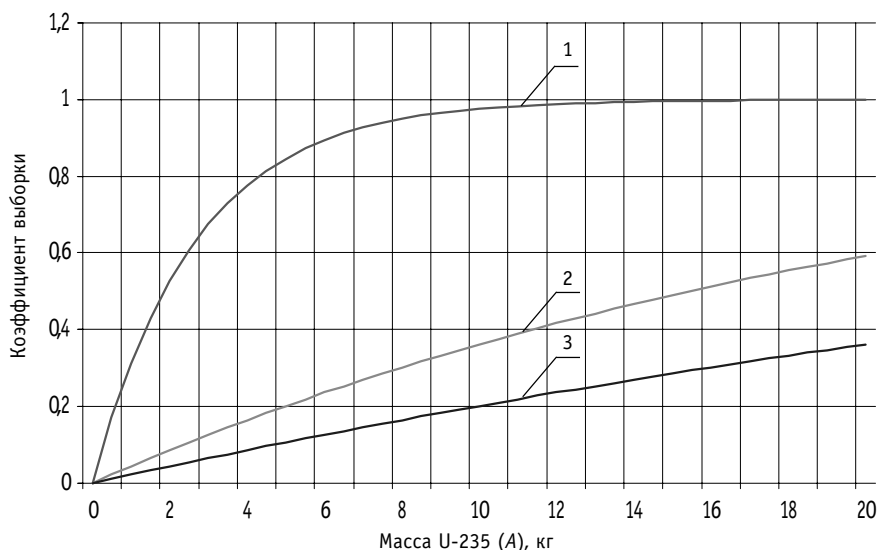


Рис. 2. Коэффициент выборки для высокообогащенного урана

### **Литература**

1. Типовая программа целевой инспекции систем учета и контроля ядерных материалов РД-08-16-98 (Госатомнадзор России).
2. International Atomic Energy Agency (IAEA) SAFEGUARDS. Statistical Concepts and Techniques. Vienna, 1989.
3. Statistical Sampling Plans for Prior Measurement Verification and Determination of the SNM Content of Inventories, prepared by C.F.Piopol, R.J.Brouns, 1982.
4. *Hough C.G., Schneider R.A., Stewart K.B.* Example of Verification and Acceptance of Operator Data – Low Enriched Uranium Fabrication: BNWL – 1852, Pacific Northwest Laboratory, 1974.
5. Франклин М. Вероятность обнаружения с помощью одного и двух методов измерения: Метод. пособие. - ФЭИ, 1998.
6. Уран. Неразрушающий гамма-спектрометрический метод определения массовой доли U-235: Отраслевая инструкция ОИ-001.456-99. - ГНЦ РФ-ВНИИНМ, 1999.

Поступила в редакцию 19.02.2001

The prognosis model and the algorithm of the lifetime evaluation and the residual lifetime prognosis of the Nuclear power plant constructional elements determined its strength reliability is considered. The algorithm based on the methods of the damaged environment mechanics.

**УДК 621.039.53**

*Application of Two Types of Non-Destructive Analysis Instruments for Spot Check of Nuclear Materials \ O.V. Krivosheina; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001.- 7 pages, 2 illustrations. – References, 6 titles.*

Methodology of spot check of nuclear materials with two types (qualitative and quantitative nuclear materials (NM) assay) of non-destructive analysis (NDA) instruments is considered in the article. Combined application of the instruments significantly decreases cost of checks, and allow to resolve the detection problem of different NM quantity theft from accounting item. New method of sampling size calculation by means of diagrams is proposed.

**УДК 51-72:621.039.534**

*Transient Model of Main Condenser for NPP Simulator \ A. A. Kazantsev, V.A. Levchenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001. - 11 pages, 2 illustrations. – References, 11 titles.*

In the paper the description of a mathematical model of the two-phase non-equilibrium heat exchanger – main condenser, designed for NPP simulator is briefly considered.

**УДК 621.039.526**

*Comparative Safety Analysis of Fast Reactors, Cooled by Alloys of Liquid Metals \ V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001.- 8 pages, 4 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.*

The results of the comparative safety analysis of LMFRs cooled by the liquid metals and their alloys are presented. The traditional type layouts with minimal (optimal) void reactivity effect are compared. Three groups of the coolant are considered: alkaline metals and their alloys, heavy metals and their alloys, and alloys of the alkaline with heavy metals.

The most preferable the LMFR cooled by Pb, Bi and Pb-Bi-alloy. The less preferable the layout, cooled by alkaline metals and their alloys. The LMFR, cooled by alloys of the alkaline with heavy metals, are takes the intermediate position by the self-protection level.

**УДК 621.039.56**

*Scattering of Slow Neutrons by Water in Critical States \ Yu.V. Lisichkin, A.G. Novikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001.- 9 pages, 4 illustrations. – References, 36 titles.*

The analysis of experimental and calculation investigations of slow neutron double-differential scattering cross sections for water, being in the sub- and supercritical states, is presented. Experimental part of this work has been performed with the double time-of flight neutron spectrometers DIN-1M and DIN-2PI, operating on the pulsed reactors IBR-30 and IBR-2 (Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna). It has been shown, the experimental results can be described in assumption that water in the nearly critical state is a mixture of two components: gas-like one with the properties, being similar to ideal gas of monomeric water molecules and liquid-like one with the properties not far from low temperature water. From the experimental data dependence of relative concentrations on these two components has been extracted as function of the water common molecular density. Physical interpretation of the results obtained is given on the basis of Ya. I. Frenkel theory of heterophase fluctuations and using thermodynamics of supercritical state and phase transitions elaborated by V. K. Semenchenko. The results obtained are compared with the experimental data of other authors as well.