

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА СЛУЧАЙНОЙ ВЫБОРКИ ЧЕРЕЗ КОЭФФИЦИЕНТ ВЫБОРКИ ПРИ НАДЗОРЕ ЗА УЧЕТОМ И КОНТРОЛЕМ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.М. Дмитриев, О.В. Кривошеина

Госатомнадзор России, г. Москва



В статье предложен способ расчета объема выборки через коэффициент выборки при проверках совокупностей учетных единиц с ядерным материалом в зависимости от массового содержания U-235 в учетной единице применительно к российским ядерным установкам. Значения коэффициента выборки приведены для различных вероятностей обнаружения порогового количества ядерного материала.

Проверка учета и контроля ядерных материалов на ядерных установках - одна из важнейших задач Госатомнадзора России, решение которой осуществляется посредством инспекций. Одна из выполняемых процедур при этом - определение фактического наличия ядерных материалов путем проведения измерений.

Целью инспекции является обнаружение несанкционированного использования (хищения или переключения) ядерного материала. При применении инспектором федерального надзора собственных технических средств измерений полученные при измерении данные сравниваются с данными, содержащимися в учетной документации ядерной установки.

Для достижения целей инспекции перед проверкой инспектору необходимо определить

- характеристики проверяемой совокупности учетных единиц в зоне баланса материалов (ЗБМ) (хранилище и т.п.) – сколько категорий ядерного материала и в каких контейнерах хранятся, группировка контейнеров (учетных единиц) по помещениям, общее количество учетных единиц, количество ядерного материала в каждой учетной единице;
- условную стоимость инспекции - какие технические и временные ресурсы потребуются для проведения инспекции (в частности, средства измерения, расходные материалы (например, азот), время пребывания персонала в помещениях с повышенным фоном, время на непосредственное проведение измерений и т.д.);
- требования к точности результатов – с какой точностью необходима оценка совокупности учетных единиц (качественная (проверка атрибутов) или количественная (проверка переменных) оценка), какая доверительная вероятность будет использоваться, какие пороговые количества ядерного материала будут приниматься.

Первые два требования определяют методику проверки, последнее требование -

результатов проверки для оценки всей совокупности. Размер выборки часто является решающим фактором, по которому выбирается план проверки. На практике все влияющие факторы должны быть взвешены, и часто возникает необходимость компромисса в решении некоторых вопросов проверки для решения других вопросов.

Таким образом, при планировании инспекции определяются:

1. Совокупность или страты, подлежащие проверке, и ядерные материалы в них. Страты формируются исходя из категории материала и количества материала в учетных единицах. В учетных единицах страты количество ядерного материала может различаться в пределах 25%.

Если в 3БМ содержится больше, чем одна категория ядерного материала в одинаковых конструктивных элементах, то материал разной категории так же, как и материал в элементах разного конструктивного исполнения должны быть учтены отдельно (как отдельная страта).

2. Стратегия проверки. Если стратификация имеет место и каждая учетная единица в страте (или совокупности) содержит приблизительно одинаковое количество ядерного материала, то должна быть выбрана стратегия инспекции: будут ли проверяться все учетные единицы в стратах или выборочно, к каким стратам будут применены технические средства измерения и какие (качественного или количественного определения материала), в каких стратах учетные единицы будут просто пересчитаны или проверена целостность устройств индикации вмешательства и т.д.

3. Доверительная вероятность и размер выборки. Если принято решение о том, какие технические средства измерения будут применены к определенным стратам, рассчитывается размер выборки с учетом погрешности средств измерений, выбранной доверительной вероятности и возможных аномалий в данной страте.

Шаги 1-3 основаны на определении формы проверки. Точность результатов будет установлена требуемым размером выборки. Однако часто это повторяющийся процесс – если требуемый размер выборки велик, он может быть снижен изменением точности измерения и/или снижением доверительной вероятности.

С учетом времени измерения одной учетной единицы определенным типом технического средства и их количества инспектор составляет план проведения измерений, учи-

Таблица 1

Значение коэффициента выборки при вероятности обнаружения 0,95 для порогового количества ЯМ 8 кг

A, кг	$d=G/A$	$K=1-\beta^{1/d}$	A, кг	$d=G/A$	$K=1-\beta^{1/d}$
0,1	80	0,0368	1,3	7	0,3484
0,2	40	0,0722	1,4	6	0,3936
0,3	27	0,1063	1,5	6	0,3963
0,4	20	0,1391	1,6	5	0,4298
0,5	16	0,1707	1,9	5	0,4298
0,6	13	0,2012	2	4	0,5271
0,7	11	0,2306	2,5	4	0,5271
0,8	10	0,2589	3	3	0,6279
0,9	9	0,2861	3,5	3	0,6279
1	8	0,3123	4	2	0,7764
1,1	8	0,3123	7,5	2	0,7764
1,2	7	0,3484	8	1	0,9500

тая все затраты и имеющиеся ресурсы.

Для решения третьего пункта плана проверки в соответствии с принятой в настоящее время методологией [1,2] объем случайной выборки учетных единиц, подлежащих проверке, определяется как

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

где N – общее число учетных единиц в совокупности; β – вероятность необнаружения недостачи (излишка) порогового количества ядерных материалов ($\beta = 1 - P$); P – вероятность обнаружения; $d = [G/A]^+$ – число учетных единиц, необходимое для получения порогового количества G изъятием из каждой учетной единицы количества $U-235$ A (полученное значение d округляется до ближайшего большего целого).

Пороговое количество G по отношению к урану в соответствии с «Основными правилами учета и контроля ядерных материалов» [3] имеет два значения по $U-235$:

- 8 кг – для ядерного материала 1,2,3 категории и
- 70 кг – для ядерного материала 4 категории.

Величина A из формулы (1) является количеством $U-235$ в учетной единице и его изъятие подразумевает изъятие всего ядерного материала из учетной единицы. Следовательно, при условии, что $d = (G/A)$, формула (1) решает проблему обнаружения только больших дефектов, равных изъятию всего ядерного материала из учетной единицы.

Таблица 2

Значение коэффициента выборки при вероятности обнаружения 0,95 для порогового количества ЯМ 70 кг

A , кг	$d=G/A$	$K=1-\beta^{1/d}$	A , кг	$d=G/A$	$K=1-\beta^{1/d}$
0,1	700	0,0043	6,5	11	0,2428
0,2	350	0,0085	7	10	0,2589
0,3	233	0,0128	7,5	10	0,2829
0,4	175	0,0170	8	9	0,2829
0,5	140	0,0212	8,5	9	0,2829
0,6	117	0,0254	9	8	0,3123
0,7	100	0,0295	9,5	8	0,3123
0,8	88	0,0337	10	7	0,3484
0,9	78	0,0378	11,5	7	0,3484
1	70	0,0419	12	6	0,3990
1,5	47	0,0622	13,5	6	0,3990
2	35	0,0820	14	5	0,4507
2,5	28	0,1015	17	5	0,4507
3	23	0,1205	17,5	4	0,5271
3,5	20	0,1391	23	4	0,5271
4	18	0,1573	23,5	3	0,6279
4,5	16	0,1752	34,5	3	0,6279
5	14	0,1926	35	2	0,7764
5,5	13	0,2097	69,5	2	0,7764
6	12	0,2265	70	1	0,9500

Таблица 3

Объем применения СКД к ядерному материалу	Вероятность обнаружения, %, не менее	
	Для категорий 1, 2, 3	Для категории 4
Только одно УИВ	50	30
Только одна система наблюдения	50	30
Одновременно два вида разнообразных СКД	25	9
Одновременно n видов разнообразных СКД	100 (0,5) ⁿ	100 (0,3) ⁿ

Данный дефект можно обнаружить средством измерения качественного определения материала (например, типа mMCA-430, Scout). При использовании средств измерения такого типа трудозатраты на выполнение измерений минимальны, дополнительные расходные материалы (например, азот) не требуются.

Решение задачи обнаружения средних и малых дефектов, равных частичному изъятию материала из учетной единицы, предложено в работе [4] с помощью совмест-

Таблица 4

Значения коэффициента выборки при различных вероятностях обнаружения для порогового количества ЯМ 8 кг

A, кг	$d=G/A$	$K (P=0,5)$	$K (P=0,25)$	$K (P=0,125)$
0,1	80	0,0086	0,0036	0,0017
0,2	40	0,0172	0,0072	0,0033
0,3	27	0,0253	0,0106	0,0049
0,4	20	0,0341	0,0143	0,0067
0,5	16	0,0424	0,0178	0,0083
0,6	14	0,0483	0,0203	0,0095
0,7	12	0,0561	0,0237	0,0111
0,8	10	0,0670	0,0284	0,0133
0,9	9	0,0741	0,0315	0,0147
1	8	0,0830	0,0353	0,0166
1,1	8	0,0830	0,0353	0,0166
1,2	7	0,0943	0,0403	0,0189
1,3	7	0,0943	0,0403	0,0189
1,4	6	0,1091	0,0468	0,0220
1,5	6	0,1091	0,0468	0,0220
1,6	5	0,1294	0,0559	0,0264
1,9	5	0,1294	0,0559	0,0264
2	4	0,1591	0,0694	0,0328
2,5	4	0,1591	0,0694	0,0328
3	3	0,2063	0,0914	0,0435
3,5	3	0,2063	0,0914	0,0435
4	2	0,2929	0,1340	0,0646
7,5	2	0,2929	0,1340	0,0646
8	1	0,5000	0,2500	0,1250

Таблица 5

**Значения коэффициента выборки
при различных вероятностях обнаруже-
ния для порогового количества ЯМ 70 кг**

M , кг	$d=G/M$	$K (P=0,3)$	$K (P=0,09)$	$K (P=0,027)$
0,1	700	0,0005	0,0001	0,0000
0,2	350	0,0010	0,0003	0,0001
0,3	234	0,0015	0,0004	0,0001
0,4	175	0,0020	0,0005	0,0002
0,5	140	0,0025	0,0007	0,0002
0,6	117	0,0030	0,0008	0,0002
0,7	100	0,0036	0,0009	0,0003
0,8	88	0,0040	0,0011	0,0003
0,9	78	0,0046	0,0012	0,0004
1	70	0,0051	0,0013	0,0004
1,5	47	0,0076	0,0020	0,0006
2	35	0,0101	0,0027	0,0008
2,5	28	0,0127	0,0034	0,0010
3	24	0,0148	0,0039	0,0011
3,5	20	0,0177	0,0047	0,0014
4	18	0,0196	0,0052	0,0015
4,5	16	0,0220	0,0059	0,0017
5	14	0,0252	0,0067	0,0020
5,5	13	0,0271	0,0072	0,0021
6	12	0,0293	0,0078	0,0023
6,5	11	0,0319	0,0085	0,0025
7	10	0,0350	0,0094	0,0027
7,5	10	0,0350	0,0094	0,0027
8	9	0,0389	0,0104	0,0030
8,5	9	0,0389	0,0104	0,0030
9	8	0,0436	0,0117	0,0034
9,5	8	0,0436	0,0117	0,0034
10	7	0,0497	0,0134	0,0039
11,5	7	0,0497	0,0134	0,0039
12	6	0,0577	0,0156	0,0046
13,5	6	0,0577	0,0156	0,0046
14	5	0,0689	0,0187	0,0055
17	5	0,0689	0,0187	0,0055
17,5	4	0,0853	0,0233	0,0068
23	4	0,0853	0,0233	0,0068
23,5	3	0,1121	0,0309	0,0091
30	3	0,1121	0,0309	0,0091
46	2	0,1633	0,0461	0,0136
69,5	2	0,1633	0,0461	0,0136
70	1	0,3000	0,0900	0,0270

ного использования двух типов приборов –качественного и количественного определения материала.

Для упрощения работы инспектора предлагается расчет объема выборки через коэффициент выборки

$$K = 1 - \beta^{1/d}. \quad (2)$$

Конечный объем выборки $n = NK$.

Коэффициент выборки определен в табл. 1, 2, составленных в зависимости от количества U-235 в учетной единице.

Из табл.1, 2 можно сделать вывод, что если масса U-235 в учетной единице больше пороговых значений 8 и 70 кг соответственно, то коэффициент выборки K равен принятой вероятности обнаружения.

Кроме этого, из табл.1,2 следует, что при массе U-235 в учетной единице 1 кг для $G=8$ кг объем выборки составляет 30% от общей совокупности учетных единиц, при 3 кг уже 60%, а при 8 – 95%; для $G=70$ кг объем выборки составляет 30%, 60%, 95% от общей совокупности учетных единиц при 8, 20, 70 кг соответственно.

Таким образом, при установленных на федеральном уровне [3] пороговых количествах 8 и 70 кг для урана инспектор практически не может обеспечить обнаружение дефектов с вероятностью 95%, т.к. объем выборки составляет более 80% от всей совокупности при массе U-235 в учетной единице более половины порогового значения. В среднем по предприятиям топливного цикла этот показатель (масса U-235 в учетной единице) сравним с пороговым значением ядерного материала.

В соответствии с п.6.4.3 «Основных правил» [3] вероятность обнаружения недостачи (излишка) порогового количества ядерных материалов для расчета объема выборки подтверждающих измерений может быть уменьшена в зависимости от применения к ним средств контроля доступа (СКД) (см. табл. 3). СКД являются технические средства, предназначенные для обнаружения несанкционированных изъятия, использования, перемещения ядерных материалов, проникновения в зону ограниченного доступа. СКД подразделяются на системы наблюдения и устройства индикации вмешательства (УИВ).

Автором работы рассчитаны значения предложенного коэффициента выборки K для вероятностей обнаружения из табл.3 [3] (50%, 25%, 12,5% (при трех СКД) для $G=8$ кг и 30%, 9%, 2,7% (при трех СКД) для $G=70$ кг). Значения коэффициента выборки для данных вероятностей обнаружения приведены в табл. 4, 5.

Таким образом, если масса U-235 в учетной единице больше или равна пороговым значениям U-235 8 и 70 кг соответственно, то конечный расчет объема выборки производится простым умножением вероятности обнаружения на полное число учетных единиц в совокупности.

Инспектор может пользоваться приведенными таблицами для оперативного расчета размера выборки при проведении инспекций, а оператор - для оперативного расчета размера выборки при проведении подтверждающих измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для целей надзора за учетом и контролем ядерных материалов в работе предложен способ расчета объема выборки при проверках совокупностей учетных единиц с ядерным материалом в зависимости от массового содержания U-235 в учетной единице применительно к российским ядерным установкам.

Полученные результаты могут быть также использованы операторами ядерных установок для определения объема выборки подтверждающих измерений при проведении физических инвентаризаций или процедурах передачи ядерного материала.

Литература

1. International Atomic Energy Agency (IAEA) SAFEGUARDS. Statistical Concepts and Techniques. Vienna, 1989.
2. Statistical Sampling Plans for Prior Measurement Verification and Determination of the SNM Content of Inventories// C.F.Piopol, R.J.Brouns,1982. – 680 с.
3. Основные правила учета и контроля ядерных материалов. НП-03-01.- Введ.09.08.2001. – М.: Госатомнадзор, 2001. – 15 с.
4. *Кривошеина О.В.* Использование двух типов приборов неразрушающего анализа для выборочной проверки ядерных материалов//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. - №1. – С.39-45.

Поступила в редакцию 24.09.2001

УДК 621.039.58:519

Development of Mathematical Model of Non-Equilibrium Two-Phase Flow for NPP Safety Analysis \ A.A. Kazantsev, V.A. Levchenko, V.V. Sergeev, V.V. Hudasko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001. – 13 pages, 8 illustrations. – References, 13 titles

It is necessary to have models, which will allow to calculate non-steady non-equilibrium thermal-hydraulic processes in NPP in real-time mode for calculation of processes in NPP simulators. The problems of obtaining of closing multiplication factors for non-steady thermal-hydraulic equations for simulator models under conditions of boiling are considered. It was made attempt of receiving of one-dimensional equations for the description of processes with taking into account the nonequilibriums of parameters and spatial non-uniformity of physical processes.

УДК 621.039.53

Determination of Amount of Sampling through Factor of Sample at Supervision on Registration and Control of Nuclear Materials \ A.M. Dmitriev, O.V. Krivosheina; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001. – 7 pages, 5 tables. – References, 4 titles

In article the way of account of sample volume through factor of sample is offered at checks of sets of registration units with a nuclear material on mass contents U-235 in registration unit with reference to the Russian nuclear installations. Meanings of factor of sample are given for various probabilities of detection of threshold amount of a nuclear material.

УДК 621.039.7:546

Heterogeneous immobilization for rise of actinide waste concentration in their long-lived storage materials \ A.A. Kozar; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001. – 10 pages, 3 illustrations. – References, 21 titles

Heterogeneous immobilization of actinide wastes is considered, that is their inclusion into carrier-matrix as particles of separate phase. The calculation of track generation intensity in matrix has been carried out on the base of the analysis of possible directions of heavy nuclei output from spherical and cylindrical waste particles. It is shown, that existence of closed area without damages in matrix is possible if volumetric actinide contents is less of 50% or 75% for spherical or cylindrical waste particles accordingly. The dependences of the ratio of doze loading for heterogeneous and homogeneous matrices on actinide particle sizes are received. It is determined, that each order of increase in actinide phase sizes corresponds to approximately one order of doze loading reduction, starting with particle radius of 10^{-5} m, when damage amount decreases in 5 times.

УДК 621.039.7

Research of methods of the substantiation of nuclear safety at handling with radioactive wastes, containing nuclear materials \ S.S. Krechetov, V.S. Vnukov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001. – 6 pages, 3 tables, 4 illustrations. – References, 10 titles

Methods of calculation of nuclear safety are investigated at handling with radioactive wastes containing nuclear materials. Calculations of the safe specific contents, the safe areal density, used are carried out at the analysis of nuclear safety of radioactive wastes. Various mixes of wastes containing water, graphite, beryllium, dioxide silicon and others, with uranium of high enrichment are considered. Recommendations for normative parameters are given at investigated at handling with wastes.