

ДО ПРОБЛЕМИ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ВИМІРЮВАНЬ

© 2010 р. А. Д. Скорбун¹, Б. М. Сплошной²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль

² Лабораторія метрології ДСП "РУЗОД", Чорнобиль

На основі огляду нормативних документів описано загальний підхід до проблеми впровадження методики оцінок невизначеностей результатів вимірювань, оскільки специфіка робіт на об'єкті "Укриття" вимагає обов'язкового використання поняття невизначеностей при оцінці таких даних. Для прикладу дається послідовний виклад оцінки невизначеності результату польових радіаційних вимірювань.

Ключові слова: невизначеність результатів вимірювань, польові радіаційні вимірювання, дисперсія, радіометр, коефіцієнт охоплення.

Вступ

Останніми роками в практику метрологічних робіт впроваджуються нормативні документи, в яких результати вимірювань описуються з використанням поняття «невизначеність», а не «похибка» вимірювань. Перехід від оцінки похибок вимірювань до оцінки їхніх невизначеностей затримується не тільки відсутністю чітких державних вимог, але й практичним незнайомством наукової спільноти з цим питанням. Відсутні не тільки необхідні в багатьох випадках прямі методики проведення таких оцінок, а й зрозумілі роз'яснення (керівництва) загального характеру з цього питання.

У 1993 р. Міжнародна організація по стандартизації (ISO) прийняла документ під назвою "Guide for estimation of uncertainty in measurements" [1] ("Керівництво з оцінки невизначеностей вимірювань", далі – керівництво з невизначеностей). У 2001 р. Міждержавною радою зі стандартизації, метрології і сертифікації було прийнято міждержавний документ [2], учасником якого є Україна. Проте цей документ широко не використовується в Україні, скоріше за все в силу складності процесу переходу на нові стандарти, у першу чергу тому, що діючі нормативні метрологічні документи орієнтують на оцінки похибки результатів вимірювань. Наприклад, в [3, 4] в якості нормованих метрологічних характеристик зазначено похибки вимірювань. Натомість вимоги до компетентності вимірювальних лабораторій, відповідно до загальних вимог [5], встановлюють, що атестовані лабораторії (будь-яка структура, що виконує вимірювання у сфері державного метрологічного нагляду, тобто й радіаційні вимірювання) повинні: а) мати та використовувати методики оцінювання невизначеності вимірювань; б) мати процедури контролю якості для здійснення поточного контролю (моніторингу) достовірності випробувань, що проводяться.

Згідно із Законом України «Про метрологію і метрологічну діяльність» дозволяється використання оцінок похибки, проте для результатів вимірювань, що направляються закордонним організаціям, необхідно давати оцінку їхніх невизначеностей. Оскільки цей закон встановлює необхідність обов'язкового контролю радіаційних параметрів атестованою лабораторією, то для всіх вимірювань, пов'язаних з об'єктом "Укриття", більшість яких виконується за міжнародними проектами, необхідно вказувати невизначеність результатів. Таким чином, з визначення, яким користувалися виключно метрологи, «невизначеність» перетворюється в поняття, невід'ємне від результату вимірювань.

Зазначимо, що хоча країни Європи і Росія [6] перейшли на використання невизначеностей, проблема переходу існує і там [7]. Питання оцінки невизначеностей широко обговорюються й українськими метрологами [8 - 10], проте з точки зору метрологічних проблем.

Оскільки серед причин того, що перехід на невизначеності стримується, є й повне незнання цього питання серед наукових працівників. У цій статті наведено стислий виклад під-

ходу до оцінки невизначеностей, а також послідовний виклад оцінки невизначеності результату польових радіаційних вимірювань.

Опис проблеми

У цілому мова йде про поступову заміну поняття "похибки результату" поняттям "невизначеності результату" вимірювань.

Документи [1, п. 2.2.3; 2, п. 3.1] установлюють такі основні поняття для опису результатів вимірювань:

"невизначеність результатів вимірювань - параметр, пов'язаний з результатом вимірювань, який характеризує розкид (dispersion) значень, які обґрунтовано можуть бути приписані величині, яка вимірюється;

стандартна невизначеність (u_c) - невизначеність результату вимірювань, виражена у вигляді середньоквадратичного відхилення;

сумарна стандартна невизначеність (u) - стандартна невизначеність результату вимірювань, отриманого через значення інших величин, яка дорівнює кореню квадратному суми членів, причому члени є дисперсіями або коваріаціями цих інших величин, зважених у відповідності до того, як результат вимірювань змінюється при зміні цих величин;

розширена невизначеність (U) - величина, яка визначається як інтервал результатів вимірювань, який, як очікується, включає в себе значну частину розподілу значень, які обґрунтовано можуть бути приписані величині, яка вимірюється".

Необхідність переходу з оцінки похибок на оцінки невизначеностей викликана рядом причин. Є причини прикладного характеру, у першу чергу те, що коли вказується точність (похибка) результатів, то частіше за все неможливо зрозуміти, як вона одержана, а при поглибленому аналізі виявляється, що зроблена оцінка точності враховує не всі можливі складові похибки результатів і т. ін. Крім того, часто існуючі оцінки похибок результатів вимірювань надаються таким чином, що їх важко в подальшому врахувати в нових вимірюваннях. Приклади будуть наведені нижче. Але є й причини фундаментального характеру. Аналіз невизначеностей базується на постулатах, що ні точне значення, ні точна похибка його одержання не можуть бути визначені [1, D5.2]: "Невизначеність результатів таким чином є відображенням того факту, що для даної величини, яка вимірюється, і для даного результату вимірювання немає єдиного значення, а є нескінченне число значень, розсіяних навколо результату, який узгоджується з усіма спостереженнями і даними, а також із знанням фізичного світу і який з певним ступенем впевненості може бути приписаний величині, яка вимірюється." Тобто ми змушені розглядати і результат, і похибку його вимірювання як невизначену величину, для оцінки якої можна вказати лише границі інтервалу, у межах яких вона знаходиться з заданою достовірністю. Але залишається невідомим, в якій точці цього інтервалу вона знаходиться. Такий підхід принципово відрізняється від прийнятого в теорії похибок, де вважається, що точне значення існує, але експериментально визначити його неможливо (див., наприклад, [11]). Цей же підхід є стандартом у математичній статистиці, де оцінюється відхилення середніх значень від невідомого, але (як вважається) існуючого точного значення [12].

Керівництво з невизначеності [1] розглядає дві різні ситуації оцінки невизначеності результатів вимірювань: перша - коли існує достатня статистична інформація (багаторазові вимірювання) (так звана оцінка за методом А); друга – коли невизначеність результату встановлюється, виходячи із загальних міркувань, наприклад із відомостей про невизначеність подібних вимірювань, що проводилися в іншому місці (так звана оцінка за методом В).

Нехай було проведено вимірювання й одержано значення вимірюваної величини $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, де n – число вимірювань. При оцінці результатів вимірювань за методом А основною характеристикою результату вимірювань є середнє значення

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (1)$$

і його стандартна невизначеність, мірою якої є стандартне відхилення

$$u \equiv \sqrt{u^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} . \quad (2)$$

Проте крім статистичного розкиду результатів існує багато інших чинників, які дають внесок у похибку вимірювань, наприклад систематичні похибки, відхилення параметрів навколишнього середовища від стандартних тощо. Внесок кожного з k таких чинників у загальну похибку вимірювань може бути виражений через його дисперсію. Тому [1, 2] визначають, що всі складові похибки мають бути виражені через їхні дисперсії. А як відомо [12], загальна дисперсія дорівнює сумі дисперсій складових, тобто розраховується просто й однозначно. Таким чином, сумарна дисперсія u_c^2 визначається як $u_c^2 = \sum_k u_k^2$. Відповідно сумарне

стандартне відхилення є

$$u_c = \sqrt{\sum_k u_k^2} . \quad (3)$$

Питання про однозначність трактовки заявленої точності вимірювань розглянемо на такому прикладі. Зазвичай при польових вимірюваннях радіометром вважають, що результати одержано з точністю, яка вказана в паспорті на прилад. Наприклад, в інструкції по використанню радіометра МКС-01Р вказується, що його основна похибка становить $\pm 20\%$. Тому при проведенні вимірювань вважається, що якщо одержали величину M , то результат вимірювань буде $M \pm 20\% \equiv M \pm 0,2M$.

Однак фахівцям добре відомо, що вищезазначена основна відносна похибка будь-якого засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) – нормована метрологічна характеристика [13], яка встановлюється при нормальних умовах експлуатації і стосується тільки конкретного ЗВТ. Ця похибка не визначає похибки вимірювань, а є лише тільки однією з її складових, тому їх не можна ототожнювати. При визначенні основної похибки використовується наближення нормального розподілу результатів вимірювань [14]. Тобто вказаний діапазон достовірності визначається через дисперсію нормального розподілу. Звідси випливає, що паспортна похибка приладу характеризується дисперсією σ^2 , яка дорівнює вказаній паспортній похибці, поділеній на відповідний так званий коефіцієнт охоплення, що залежить від величини вибраного довірчого інтервалу. Ці коефіцієнти є стандартними статистичними параметрами нормального розподілу, і ми для довідок наведемо нижче значення коефіцієнта охоплення k_p , який створює інтервал, що має рівень довіри p у припущенні нормального розподілу [1, табл. G1]:

Рівень довіри p , %	Коефіцієнт охоплення k_p
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

Рівень довіри $p = 95\%$ означає, що для 95% елементів вибірки нормально розподіленої величини відхилення їхніх значень від середнього не перевищує $1,960u$.

Таким чином, для нашого прикладу $u(P_k) = \frac{20}{1,96}\% = 10,2\%$, або $u(P_k) = \frac{0,2}{1,96} = 0,102$.

Якщо розподіл невідомий (читай, не нормальний), керівництво з невизначеностей пропонує припускати рівномірний розподіл, для якого вважається, що величини рівномірно розподілені в деякому інтервалі. Для рівномірного розподілу дисперсія пов'язана з шириною інтервалу коефіцієнтом $\sqrt{3}$. Якби ми не мали можливості провести зроблений вище аналіз

через відсутність інформації про природу появи величини 20 %, тоді рекомендується використовувати припущення рівномірного розподілу і в цій ситуації $u(P_k) = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,116$.

Після того, як буде проаналізовано всі можливі джерела похибок, розраховано їхні невизначеності й підраховано сумарну невизначеність результату за формулою (3), необхідно підрахувати розширену невизначеність, яка, як указувалось, є інтервалом, в якому знаходиться основна частка результатів вимірювань. Ця величина є похідною від дисперсії розподілу результатів вимірювань, а отже, залежить від виду розподілу й дорівнює $U = k_p u_c$. Значення k_p для нормального розподілу дано вище, а для рівномірного розподілу воно дорівнює $k_p = \sqrt{3}$.

Приклад підрахунку невизначеності

Процедура обчислення невизначеності ґрунтується на визначенні дисперсії для кожного фактора, що впливає на результат, і підрахунку сумарної дисперсії.

1. Проводиться вимірювання потужності еквіваленту дози (ПЕД) за допомогою радіометра-дозиметра МКС-01Р. Для даного розрахунку було проведено багаторазові вимірювання у визначеній точці та отримано результати, мкЗв/год: 4,06; 3,88; 3,44; 3,84; 3,92.

2. Необхідно визначити результат вимірювання та оцінити невизначеність вимірювань. Складаємо специфікацію вимірювань:

аналіз умов вимірювань: вимірювання проводяться в польових умовах при температурі повітря +30 °С та підвищеної вологості ;

аналіз технічних характеристик дозиметра-радіометра:

1) робочі умови використання дозиметра-радіометра: температура повітря від мінус 10 до 40 °С; відносна вологість повітря до 98 %;

2) межі допустимої основної похибки при вимірюванні ПЕД ± 20 %;

3) випадкова статистична похибка за результатами п'яти спостережень $\pm 6,0$ %;

4) додаткова похибка при впливі підвищеної та пониженої температури ± 10 % на 10 С зміни температури;

5) додаткова похибка, обумовлена змінами напруги акумуляторної батареї від номінального (8,75 В) до мінімального (7,3 В) значень ± 5 %;

6) додаткова похибка від нестабільності показів приладу за 6 год безперервної роботи ± 10 %;

7) додаткова похибка від впливу підвищеної вологості ± 6 %.

3. Розраховуємо невизначеність за типом А. Перевіряємо наявність грубих похибок. Для цього (у припущенні нормального розподілу) розраховуємо середнє арифметичне отриманих результатів

$$\bar{P} = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 P_k = 3,83 \text{ мкЗв/год};$$

стандартне відхилення результатів від середнього арифметичного

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (P_k - \bar{P})^2} = 0,23 \text{ мкЗв/год};$$

інтервал невизначеності, у припущенні нормального закону розподілу результатів спостережень

$$\varepsilon = 3s = 0,69 \text{ мкЗв/год};$$

границі цього інтервалу для результатів спостережень

$$P_{\min} = 3,14 \text{ мкЗв/год}; \quad P_{\max} = 4,52 \text{ мкЗв/год};$$

Висновок: усі результати не виходять за границі інтервалу, тобто не вміщують помилкових значень (викидів) у припущенні нормального їх розподілу.

4. Визначаємо складові розширеної невизначеності вимірювання:

1) зі свідчення на радіометр-дозиметр відомо, що межі його основної відносної похибки $\pm 20\%$. Відповідна відносна стандартна невизначеність $\sigma(P_k)$ вимірювань ПЕД розраховується за формулою для нормального розподілу ймовірностей

$$\sigma(P_k) = \frac{20}{1.96} \% = 10,2\% ;$$

2) випадкова статистична похибка вимірювання по п'яти результатам $\pm 6,0\%$. Це і є необхідне відносне середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_B = 6,0 \% ;$$

3) додаткова похибка дозиметра від зміни температури в робочих умовах використання становить $\pm 10\%$ на 10^0C зміни температури, тобто стандартна невизначеність від зміни температури $\sigma(P_{KT})$ визначається за формулою прямокутного розподілу

$$\sigma(P_{KT}) = \frac{10}{\sqrt{3}} \% = 5,78\% ;$$

4) додаткова похибка дозиметра від зміни напруги $\pm 5\%$. Відносна стандартна невизначеність від зміни напруги живлення в робочих умовах використання $\sigma(P_{KJ})$ розраховується за формулою прямокутного розподілу ймовірностей

$$\sigma(P_{KJ}) = \frac{5}{\sqrt{3}} \% = 2,9\% ;$$

5) додаткова похибка від нестабільності показів дозиметра за час безперервної роботи на перевищує $\pm 5\%$. Оскільки ніякої додаткової інформації про форму розподілу не наведено, а додаткова похибка з рівною ймовірністю може з'явитися в усьому діапазоні вимірювань, то відносна стандартна невизначеність $\sigma(P_{KH})$ розраховується за формулою прямокутного розподілу ймовірностей

$$\sigma(P_{KH}) = \frac{5}{\sqrt{3}} \% = 2,9\% ;$$

6) додаткова відносна похибка вимірювання ПЕД при змінах відносної вологості $\pm 6\%$. Відносна стандартна невизначеність $\sigma(P_{KB})$ розраховується за формулою прямокутного розподілу ймовірностей

$$\sigma(P_{KB}) = \frac{6}{\sqrt{3}} \% = 3,5\% ;$$

7) додаткова відносна похибка вимірювання ПЕД, що виникає від невизначеності положення детектора радіометра-дозиметра по радіусу свердловини. У даній ситуації раціонально прийняти, що детектор може знаходитися в будь-якій точці по радіусу. Теоретичні розрахунки (виконані за допомогою програми MicroShield) залежності величини поля у свердловині в різних точках по її радіусу дали відносну похибку для цього фактора впливу $\pm 5\%$. У даному випадку відносна стандартна невизначеність $\sigma(P_{CM})$ розраховується за формулою для прямокутного розподілу ймовірностей

$$\sigma(P_{CM}) = \frac{5}{\sqrt{3}} \% = 2,9\% .$$

5. Розрахунок сумарної відносної стандартної невизначеності наведено в таблиці.

Джерела невизначеності	Відносна стандартна невизначеність, %	Тип невизначеності	Розподіл імовірностей
Основна відносна похибка дозиметра $\sigma(P_k)$	10,2	B	нормальний
Випадкова статистична похибка дозиметра $\sigma(P_{kc})$	6,0	B	нормальний
Додаткова похибка дозиметра від температури $\sigma(P_{кт})$	5,78	B	прямокутний
Додаткова похибка дозиметра від зміни напруги живлення $\sigma(P_{кж})$	2,9	B	прямокутний
Додаткова похибка дозиметра від нестабільності показів дозиметра за час безперервної роботи $\sigma(P_{кн})$	2,9	B	прямокутний
Додаткова похибка дозиметра від зміни вологості повітря $\sigma(P_{кв}),\%$	3,5	B	прямокутний
Додаткова відносна похибка вимірювання ПЕД, що виникає від невизначеності положення детектора радіометра-дозиметра по радіусу свердловини	2,9	B	прямокутний
Потужність еквівалентної дози гамма-випромінювання $\bar{P} = 3,83$ мкЗв/год	Сумарна відносна стандартна невизначеність $U_c = \sqrt{(10,2)^2 + (6,0)^2 + (5,78)^2 + (2,9)^2 + (2,9)^2 + (3,5)^2 + (2,9)^2} = 14,5\%$		

6. Оцінка розширеної невизначеності для рівня довіри 0,95. Визначимо розширену невизначеність результату вимірювання як $U = k \cdot U_c(\bar{P})$, де k - коефіцієнт охоплення, який для рівня довіри 95 % дорівнює 1,96 (у припущенні нормального розподілу), але в загальній практиці для простоти пропонується вживати $k = 2$.

$$U = 2 \cdot 14,5\% = 29\%.$$

Оскільки розрахунок меж похибки результату вимірювань (Δ) рекомендується представляти в абсолютних одиницях, то

$$\Delta = \bar{P} \cdot \frac{U}{100\%}, \text{ або } 3,83 \cdot \frac{29\%}{100\%} = 1,11 \text{ мкЗв/год,}$$

де U - розширена невизначеність вимірювань (або основна відносна похибка, яка вказується у свідоцтві про повірку приладу).

7. Результат вимірювання записується у вигляді

$$\text{ПЕД} = 3,83 \pm 1,11 \text{ мкЗв/год}$$

Висновки

Радикальні зміни в метрології, що пов'язані з впровадженням у метрологічну практику поняття «невизначеність» для характеристики якості вимірювань, потребують пояснень схеми її визначення. Це не є рутинною роботою, а залежить від детального аналізу величини, що вимірюється. Оцінка невизначеності важлива, бо дає змогу оцінити надійність результатів вимірювань при їхньому використанні.

Актуальність застосування нових підходів очевидна, якщо врахувати, що атестовані вимірювальні лабораторії зобов'язані мати процедури контролю якості для здійснення поточного контролю (моніторингу) достовірності випробувань, що проводяться, тобто вміти надавати оцінку невизначеності результатів проведених вимірювань.

Привнесення в процедури радіаційного контролю нової термінології та необхідності особливої ретельності в аналізах і розрахунках підвищує вимоги до персоналу, який має знати та бути спроможним розрахувати відповідні статистичні параметри для оцінки якості власних вимірювань. Правильне виконання та обчислення результатів вимірювань створює умо-

ви для взаємного їхнього визнання зацікавленими сторонами. Як видно, коректне обчислення невизначеності результату вимірювання може майже на третину збільшити основну відносну похибку дозиметра, яку зазвичай приймають за похибку вимірювань. Хотілося б підкреслити, що цього не треба боятися, тому що одержані розширені межі невизначеності результату вимірювань хоча зовні й погіршують результат, проте стають значно ближчими до реальності. Крім того, для заданих умов проведення вимірювань такий розрахунок, тобто ретельний аналіз складових невизначеності, досить виконати лише один раз.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Guide to expression of uncertainty in measurement: First edition.* – ISO. Switzerland, 1993.
2. *РМГ 43-2001.* ГСИ. Применение "Руководства по выражению неопределенностей измерений" / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. - Минск: ИПК "Издательство стандартов", 2003.
3. *ГОСТ 8.009-84.* Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
4. *МИ 1317-86.* Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.
5. *ДСТУ ISO/IEC 17025-2001.* Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.
6. *ГОСТ Р 8.594-2002.* Метрологическое обеспечение радиационного контроля.
7. *Kirkup L.* A guide to GUM // *Eur. J. Phys.*, - 2002. - Vol. 23. - P. 483 - 487.
8. *Захаров І.* Взаємне перерахування похибок та невизначеностей вимірювань // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2005. - №5. – С. 49 - 56.
9. *Захаров І.* Оценивание неопределенности измерений при проведении калибровок // *Метрологія та прилади.* – 2007. - № 1. – С. 31 – 42.
10. *Чепела В., Никитин Д.* Методики расчета неопределенности измерений в метрологии // Там же. – 2008. - № 4. – С. 51 - 54.
11. *Щиголов Б. М.* Математическая обработка наблюдений. - М.: Наука, 1969. – С. 344.
12. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. - М.: Наука, 1969. – 363 с.
13. *ГОСТ 27451-87.* Средства измерений ионизирующих измерений. Общие технические условия.
14. *ГОСТ 25935-83.* Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров.

К ВОПРОСУ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

А. Д. Скорбун , Б. Н. Сплошной

На основе обзора нормативных документов описан общий подход к проблеме внедрения методики оценок неопределенности результатов измерений, поскольку специфика работ на объекте "Укрытие" требует обязательного использования понятия неопределенностей при оценке таких данных. Для примера дается последовательное изложение оценки неопределенности результата полевых радиационных измерений.

Ключевые слова: неопределенность результатов измерений, полевые радиационные измерения, дисперсия, радиометр, коэффициент охвата.

TO THE ISSUE OF IMPLEMENTATION OF A METHOD FOR MEASUREMENT UNCERTAINTIES DETERMINATION

A. D. Skorbun, B. M. Sploshnoy

On the base of review of normative documents a general approach to the issue of implementation of a method for estimation of measurement results uncertainty have been described, because of specific character of works at the "Ukrytya" object requires obligatory use of uncertainty for estimation of such data. As an example, the consecutive description of estimation of field radiation measurement results uncertainty is given.

Keywords: uncertainty of measurement results, field radiation measurements, variance, radiometer, coverage factor.

Надійшла до редакції 30.03.10