

# О НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ (Часть I)

**Доц., др. С.К. КАДЫШЕВ**

Управление метрологии Кыргызстандарт

**Доц., др. Т.Т. КАРАШЕВА**

Кыргызско-Турецкий университет «Манас»

**С.Т. АСАНАЛИЕВ**

Управление метрологии Кыргызстандарт

При составлении отчета о результате измерения физической величины необходимо дать какое-либо количественное указание о качестве результата так, чтобы те, кто используют этот результат, могли бы оценить его надежность. Без такого указания результаты измерения нельзя сличать как друг с другом, так и со справочными значениями, данными в спецификации или стандарте. С другой стороны, распространение в конце XX века метрологических измерений на новые области, привело к усложнению методик выполнения измерений, тем самым, появилась необходимость выработки простой в применении, понятной и общепризнанной в международном масштабе методики для характеристики качества результата измерения.

Признавая отсутствие единого мнения по этому вопросу в мировой метрологической практике, наивысший мировой авторитет в метрологии - Международный комитет мер и весов (МКМВ) в 1978 г. обратился к Международному бюро мер и весов (МБМВ) с просьбой рассмотреть эту проблему с национальными метрологическими лабораториями и передала Международной организации по стандартизации (ИСО), которая могла лучше выразить потребности, возникающие из широких интересов промышленности и торговли, разработку подробного Руководства. Ответственность была возложена на Техническую консультативную группу по метрологии ИСО (TAG 4), поскольку одной из ее задач является координация развития основных направлений в области измерений, которые представляют взаимный интерес для ИСО и шести организаций, принимающих участие вместе с ИСО в работе TAG 4: Международной электротехнической комиссии (МЭК), партнера ИСО по всемирной стандартизации; Международной федерации клинической химии (МФКХ); Международного союза по чистой и прикладной химии (ИЮПАК) и Международного союза по чистой и прикладной физике (ИЮПАП), двух международных союзов, представляющих химию и физику; МБМВ и Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ) – двух мировых метрологических организаций.

В 1993-году под эгидой этих организаций, опубликовано “Руководство по выражению неопределенности измерения” (далее по тексту Руководство) [1], а в 1999-году его перевод на русский язык [2].

С выходом в свет этих публикаций, продолжается широкая дискуссия на тему о правомерности и целесообразности повсеместного использования в

научно-технической литературе термина “*неопределенность результатов измерения*” (НРИ) вместо традиционного и привычного понятия “*погрешность результатов измерения*” (ПРИ). Этому вопросу посвящено огромное количество публикаций в дальнем зарубежье [3-7] и статей в российских научно – технических изданиях по метрологии, как “*Законодательная и прикладная метрология*” [8-11], “*Измерительная техника*” [12-26] и в материалах III научно-технической конференции “*Метрологическое обеспечение народного хозяйства России*”; 17-21 ноября 1997 [27]. Часть материалов этой конференции, посвященные концепции выражения НРИ опубликованы в журнале “*Законодательная и прикладная метрология*”, №1, с. 27-37 (1998)

Спектр мнений относительно этой новой концепции чрезвычайно широк. При этом имеются диаметрально противоположные мнения: с точки зрения одних, отличие от концепции погрешности чисто терминологическое, в то же время другие считают, что предлагается принципиально новая концепция оценки точности измерения, позволяющая существенно расширить класс решаемых задач.

Тем не менее, концепция уже применяется во многих развитых странах мира, и нашей республике, как и всем странам СНГ, необходимо ее внедрить, так как, интеграция Кыргызской Республики в Международное сообщество (членство во Всемирной Торговой Организации (ВТО), в Межгосударственном Совете по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС), в Евро-Азиатском сотрудничестве государственных метрологических учреждений (КООМЕТ) и др.) требует гармонизации государственных стандартов и других нормативных документов с международными, в том числе и в области метрологии. На 16-ом заседании Научно-технической комиссии МГС (10-октября 2002 г., г. Москва) рассмотрен вопрос “О внедрении оценки НРИ в метрологическую практику государств-участников Соглашения”, а на 22-ом заседании МГС (10-ноября 2002 г., г. Москва) утвержден план мероприятий внедрения.

К сожалению, в силу объективных причин не все специалисты в области метрологии, науки и техники нашей республики ознакомлены с этой концепцией. Одной из причин, не позволяющая широкому кругу научно-технических кадров ознакомиться с основными положениями концепции, является ограниченность тиража издания перевода [2] и отсутствие научно-технической литературы и публикаций в периодических изданиях КР по неопределенности измерений. В связи с этим, целью настоящей статьи является, ознакомление читателей с основными методами определения НРИ.

По замыслу авторов, Руководство должен найти применение, практически во всех областях измерений, включая, в первую очередь, измерения, выполняемые:

- при решении задач обеспечения качества продукции;
- при контроле качества продукции в процессе ее производства;
- согласованности и усиления законов и регулирующих актов;
- при проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок в науке и технике;
- при проверке и калибровке средств измерений (включая эталоны различных рангов);
- при разработке и метрологических исследованиях стандартных образцов свойств веществ и материалов;

**О новой концепции количественной характеристики качества измерений**

- при разработке и сличении международных и национальных эталонов единиц физических величин.

При “классическом” определении погрешности, обозначаемой  $\Delta$ , исходной является хорошо известная всем формула:  $\Delta = x_{изм} - x_{ист}$ , (1)

где  $x_{изм}$  и  $x_{ист}$  - результат измерения, и истинное значение измеряемой величины, соответственно.

Но по причине невозможности экспериментального определения истинного значения измеряемой величины с философской точки зрения, вслед за формулой (1) пишется похожая, но вместе с тем принципиально другая формула:

$$\Delta \approx x_{изм} - x_{дейст}. \quad (2)$$

где  $x_{дейст}$  - действительное значение измеряемой величины, которое должно быть достаточно близким к истинному значению.

Вопрос о том, насколько близким – один из наиболее трудных вопросов в теории погрешностей измерений.

Следует заметить, что в формуле (2) вместо знака строгого равенства появляется знак приближенного равенства ( $\approx$ ). С этого момента мы вынуждены рассматривать погрешность измерений ( $\Delta$ ), как сугубо неопределенную величину, для которой можно получать лишь более или менее приемлемые (по точности) оценки.

В связи с этим, в Руководстве большое внимание уделяется различию терминов “погрешность” и “неопределенность” и в пункте 3.2.2 (примечание 2) утверждается, что они не синонимы и представляют собой совершенно различные понятия. По определению авторов Руководства, *погрешность измерения* – отклонение результата измерения от истинного значения измерения. Поскольку истинное значение не может быть определено, то и погрешность, как идеализированное понятие не может быть известна точно. Поэтому, авторы постарались во первых, по возможности отказаться, от использования при изложении понятий “погрешность” и “истинное значение измеряемой величины” в пользу понятий “неопределенность” и “оцененное значение измеряемой величины”, во вторых, переход от деления погрешностей по природе их проявления на “случайные” и “систематические” к другому делению – по способу оценивания неопределенностей измерений (*по типу А* – методами математической статистики и *по типу В* – другими методами).

Основным понятием, используемым в Руководстве, является понятие “неопределенность измерения”. В разделе II дается два определения этого понятия:

В своем самом широком смысле “неопределенность измерения” означает сомнение относительно достоверности результата измерения.

Неопределенность измерения есть параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Основным количественным выражением неопределенности измерений, является стандартная неопределенность.

В Руководстве не оперируют формулами вида (1) и (2), а измеряемая величина  $Y$  определяется, как  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ , (2)

где,  $X_1, X_2, \dots, X_N$  – входные величины (непосредственно измеряемые или другие величины, влияющие на результат измерения);  $N$  – число этих величин;  $f$  – вид функциональной зависимости.

Оценка измеряемой величины  $y$  вычисляется, как функция оценок входных величин  $x_1, x_2, \dots, x_N$  после внесения поправок на все известные источники, имеющие систематический характер:  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ . (3)

Затем вычисляются стандартные неопределенности входных величин

$$u(x_i) (i=1, 2, \dots, N)$$

Различают два типа вычисления стандартной неопределенности:

- вычисление *по типу А* – это дисперсия закона распределения результата измерения с классической частотной интерпретацией;
- вычисление *по типу В* – с использованием других способов.

Исходными данными для оценки стандартной неопределенности *по типу А*, являются результаты многократных измерений:  $x_i$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ )

В большинстве случаев доступная наилучшая оценка ожидаемого значения  $\mu_x$  величины  $x$ , изменяющийся случайным образом, для которой получены  $n$  независимых наблюдений  $x_i$  при одинаковых условиях измерения, является среднее арифметическое или среднее значение  $\bar{x}$  из  $n$  наблюдений:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ .

Экспериментальная дисперсия наблюдений, которая оценивает дисперсию  $S^2$  распределения вероятностей  $x$ , получается как:  $s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$  (4).

Эта оценка дисперсии выборки и ее положительный квадратный корень  $s(x_i)$ , называемый экспериментальным стандартным отклонением, характеризует изменчивость наблюдаемых значений  $x_i$  или, точнее, их дисперсию относительно среднего значения  $\bar{x}$ . Наилучшая оценка  $s^2(\bar{x}) = \frac{s^2}{n}$  дисперсии среднего значения

выражается как:  $s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n}$  (5). Экспериментальная дисперсия среднего  $s^2(\bar{x})$  и

экспериментальное стандартное отклонение среднего значения  $s(\bar{x})$ , равное положительному квадратному корню из  $s^2(\bar{x})$ , количественно определяют, насколько хорошо  $\bar{x}$  оценивает ожидание  $m_x$  величины  $x$ . Таким образом, для входной величины  $X_i$ , определенной из  $n$  независимых наблюдений, стандартная неопределенность  $u(x_i)$  ее оценки  $x_i = \bar{X}_i$  ( $\bar{X}_i = (\sum_{k=1}^n X_{i,k}) / n$ ) есть  $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$  с  $s^2(\bar{X}_i)$ , вычисленным

согласно уравнению (4), т.е.  $u(x_i) = u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$  (6)

**О новой концепции количественной характеристики качества измерений**

Исходными данными для оценки неопределенности *по типу В* являются:

- данные предшествовавших измерений величин, входящих в уравнение измерения, сведения о виде распределения вероятностей;
- данные, основанные на опыте исследователя или общих знаниях о поведении и свойствах соответствующих приборов и материалов;
- неопределенности констант и справочных данных;
- данные поверки, калибровки, сведения изготовителя о приборе и др.

Неопределенности этих данных, обычно представляются в виде границ отклонения значения величины от ее оценки. Наиболее распространенный способ формализации неполного знания об измеряемой величине базируется на постулате вероятностного закона распределения (обычно равномерного) в указанных (нижней и верхней) границах ( $a_-$ ,  $a_+$ ). При этом стандартная неопределенность, оцененная *по типу В*, равна:  $u = u_B = \frac{a_+ + a_-}{2\sqrt{3}}$ , (7)

для симметричных границ ( $\pm a$ ):  $u = u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$  (8)

В случае других законов распределения формулы для вычисления стандартной неопределенности *по типу В* будут иными.

На практике часто входные величины получаются из одновременных наблюдений двух и более взаимосвязанных величин, т.е., они коррелированы и эти корреляции должны приниматься во внимание при вычислении стандартных неопределенностей измеряемых величин.

Суммарная стандартная неопределенность  $u_c(y)$  представляет собой положительный квадратный корень из суммарной дисперсии, полученной из формулы:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i);$$

означает оцененное стандартное отклонение и характеризует разброс значений, которые могут быть, с достаточным основанием, приписаны измеряемой величине  $Y$ .

В случае некоррелированных оценок ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) суммарная неопределенность вычисляется по формуле:  $u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}$  (9)

В случае коррелированных оценок  $x_1, x_2, \dots, x_N$ ,  $u_c(y)$  вычисляется по формуле:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (10)$$

где  $u(x_i, x_j) = r(x_i, x_j)u(x_i)u(x_j)$ ;  $r(x_i, x_j)$  - коэффициент корреляции, который является мерой относительной взаимной зависимости двух случайных величин, равной отношению их ковариаций к положительному квадратному корню из

произведений их дисперсий. Следует отметить, что рассчитанный коэффициент корреляции, всегда является просто числом, таким что выполняется:

$$-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1.$$

Расширенная неопределенность, как величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли быть приписаны измеряемой величине, определяется по формуле:

$$U = k \times u_c(y) \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент охвата – числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности;  $k = t(v_{эфф})$ , где  $t(v_{эфф})$  – распределение Стьюдента при числе

эффективных степеней свободы: 
$$n_{эфф} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{n_i} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4} \quad (12)$$

где  $v_i$  – число степеней свободы при определении  $n$   $v_i = n - 1$  для оценивания по типу А ( $n$  – число результатов измерений);  $v_i = \infty$  для оценивания по типу В.

Значение коэффициента охвата  $k$  выбирается на основе уровня доверия, требуемого интервалом от  $y-U$  до  $y+U$ . В идеале хотелось бы иметь возможность выбрать конкретное значение коэффициента охвата  $k$ , которое обеспечивало бы интервал  $Y = y \pm U = y \pm k \times u_c(y)$ , соответствующий выбранному уровню доверия, такому как 95 или 99 процентов; равным образом, для заданного значения  $k$  хотелось бы иметь возможность четко указать уровень доверия, связанный с этим интервалом. Однако это нелегко осуществить на практике, поскольку требуется полное знание распределения вероятностей, характеризуемого результатом измерения  $y$  и его суммарной стандартной неопределенностью  $u_c(y)$ . Во многих практических случаях при вычислении неопределенностей измерений делают предположение о нормальности закона распределения возможных значений измеряемой величины и полагают:  $k=2$  при уровне доверия  $p \approx 0,95$  или  $k=3$  при уровне доверия  $p \approx 0,99$ .

При составлении отчета о результате измерения и выражении его неопределенности, рекомендуется:

I. Когда указывается результат измерения и мерой неопределенности является суммарная неопределенность  $u_c(y)$ , следует:

- дать полное описание того, как определяется измеряемая величина  $Y$ ;
- дать оценку  $y$  измеряемой величины  $Y$  и стандартные неопределенности по типу А и по типу В;
- дать оценку суммарной стандартной неопределенности  $u_c(y)$ ; всегда должны быть указаны единицы измерения для  $y$  и  $u_c(y)$ .

Если это предполагается полезным для лиц, которые намерены воспользоваться результатом измерения, например, для того чтобы помочь в

**О новой концепции количественной характеристики качества измерений**

будущем при расчетах коэффициентов охвата или помочь в понимании измерения, можно указать, оцененные числа эффективные степени свободы  $n_{эфф}$ .

II. Когда указывается результат измерения и мерой неопределенности является расширенная неопределенность  $U = k \times u_c(y)$ , следует:

- дать полное описание, как определено измеряемая величина  $Y$ ;
- указать результат измерения  $Y = y \pm U$  и привести единицы измерения для  $y$  и  $U$ ;
- дать значение  $k$ , используемое для получения  $U$  (или дать и  $k$  и  $u_c(y)$  для удобства тех, кто использует результат);
- привести приблизительный уровень доверия, связанный с интервалом  $y \pm U$  и указать, как он был определен.

При вычислении неопределенности измерений следует придерживаться последовательности: запись уравнения измерений  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \Rightarrow$  вычисление оценок  $x_1, x_2, \dots, x_N \Rightarrow$  определение результата измерений  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \Rightarrow$  вычисление стандартной неопределенности  $i$ -ой входной величины  $u_A(x_i)$  и  $u_B(x_i) \Rightarrow$  вычисление коэффициентов корреляции  $r(x_i, x_j) \Rightarrow$  вычисление суммарной стандартной неопределенности  $u_c(y) \Rightarrow$  определение числа эффективных степеней свободы ( $n_{эфф}$ ) и коэффициента охвата ( $k$ )  $\Rightarrow$  вычисление расширенной неопределенности измерений ( $U$ ).

Сравнительный анализ концепции НРИ Руководства и концепции ПРИ в действующих нормативных документах, позволяет сделать выводы о том, что в концепциях имеются различия в основном терминологического характера, и в то же время много общего:

- методы вычисления неопределенностей, также как и методы оценивания характеристик погрешности заимствованы из математической статистики;
- вычисление стандартной неопределенности по типу А совпадает с вычислением среднего квадратического отклонения случайной погрешности результата измерений;
- метод вычисления расширенной неопределенности практически идентичен методу определения доверительных границ ПРИ.

С другой стороны, концепция НРИ достаточно полно включает детальные описания процедур их оценивания.

По нашему мнению, в целях гармонизации метрологических документаций КР с международными нормативными актами, необходимо внедрять концепции Руководства в метрологическую практику КР наравне с действующими. Эти документы должны планомерно дорабатываться, с включением в них раздела по оценке неопределенности, а во вновь разрабатываемые нормативные документы вводить концепции Руководства.

Завершая ознакомление читателей с основными положениями концепции неопределенности измерений, сочли необходимым привести формулировку авторов Руководства, из пункта 3.4.8, раздела «Основные понятия»: «Хотя это Руководство дает схему определения неопределенности, оно не может заменить

критическое размышление, интеллектуальную честность и профессиональное мастерство. Оценка неопределенности не является ни рутинной работой, ни чисто математической, она зависит от детального знания природы измеряемой величины и измерения. Поэтому качество и ценность неопределенности результата измерения, в конечном счете, зависит от понимания, критического анализа и честности тех, кто участвует в приписывании ее значения”.

В заключение авторы надеются, что, как и Международная система единиц измерения (СИ), будучи системой, практически универсального использования, привнесла согласованность во все научные и технологические измерения, идеи концепции неопределенности измерения обеспечат должное понимание и правильное использование широкого спектра результатов измерений в науке, технике, торговле, промышленности и регулирующих актах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Guide to the Expression Uncertainty in Measurement:** First edition – Geneva, Switzerland: ISO, 1993.
10. АСЛАНЯН Э.Г., ДОЙНИКОВ А.С. **Законодательная и прикладная метрология**, 4, 38 (2002).
11. ДОЙНИКОВ А.С. **Законодательная и прикладная метрология**, 5, 46 (2002).
12. ТАРБЕЕВ Ю.В., СЛАЕВ В.А., ЧУНОВКИНА А.Г. **Измерительная техника**, 5, 67 (1997).
13. БРЯНСКИЙ Л.Н., ДОЙНИКОВ А.С., КРУПИН Б.Н. **Измерительная техника**, 8, 15 (1997).
14. КВИН Е. Дж. **Измерительная техника**, 8, 15 (1998).
15. БРЯНСКИЙ Л.Н., ДОЙНИКОВ А.С., КРУПИН Б.Н. **Измерительная техника**, 9, 3 (1999).
16. МАРКОВА Е.В.. **Измерительная техника**, 5, 24 (2000).
17. СЛАЕВ В.А., ЧУНОВКИНА А.Г., ЧУРСИН А.В.. **Измерительная техника**, 5, 26 (2000).
18. НЕЖИХОВСКИЙ Г.Р. **Измерительная техника**, 5, 27 (2000).
19. БРЯНСКИЙ Л.Н., ДОЙНИКОВ А.С., КРУПИН Б.Н. **Измерительная техника**, 5, 29 (2000).
2. **Руководство по выражению неопределенности измерения.** Перевод с англ. под науч. ред. проф. В.А. Слаева, С.П.б.: ГП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999, Рекомендация ГСИ «Применение “Руководства по выражению неопределенности измерения”», С.П.б.: ГП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.
20. ФРИДМАН А.Э. **Измерительная техника**, 5, 32 (2000).
21. КАДИС Р.Л. **Измерительная техника**, 5, 33 (2000).
22. СЛАЕВ В.А. **Измерительная техника**, 5, 35 (2000).
23. ЧУНОВКИНА А.Г. **Измерительная техника**, 7, 19 (2000).
24. ИВАНОВ В.С., ЗАУТЕР Г., КОТЮК А.Ф., СТОЛЯРОВСКАЯ Р.И..

**О новой концепции количественной характеристики качества измерений**

- Измерительная техника**, 10, 22 (2001).
25. КУЗНЕЦОВ В.А.. **Измерительная техника**, 10, 38 (2001).
  26. ДОЙНИКОВ А.С., ЗДОРИКОВ Н.Н., КАРПОВ О.В., ЛАХОВ В.М., МАКСИМОВ И.И., СЕЙКУ Е.Е.. **Измерительная техника**, 2, 66 (2002).
  27. Тезисы докл. III научно-технической конференции “**Метрологическое обеспечение народного хозяйства России**”; 17-21 ноября 1997г.
  3. **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results**, - NIST Technical Note 1297, 1993.
  4. **Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement**, EURACHEM, 1995. Количественное описание определенности в аналитических измерениях. Перевод с англ., С.П.б.: ГП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1997.
  5. **Random and Systematic VS. Type A and Type B Measurement Uncertainty** // Proceedings NCSL Workshop & Symposium, p.577 (1993).
  6. **Expressing of the Uncertainty of Measurement in Calibration**, -EAL,-R2 (1997)
  7. GRABE M. **Towards a new standard for the assignment of Measurement Uncertainties**: National Conference of Standard Laboratories.-Chicago, 1994.
  8. КАЛМАНОВСКИЙ В.И. **Законодательная и прикладная метрология**, 2, 50 (1998)
  9. ДОЙНИКОВ А.А., ДОЙНИКОВ А.С. **Законодательная и прикладная метрология**, 2, 23 (2000)