

SOME PRACTICAL ISSUES ON EVALUATION OF UNCERTAINTY IN LABORATORY PRACTICE

V.R. Konstantinova

In this paper some problems on implementation of international requirements for measurement uncertainty in laboratories are discussed. The proposals for their resolving can be debated by metrologists. They could be useful and assist the specialists in evaluation of experimental and measurement results in accordance with international documents on measurement uncertainty.

Keywords: *measurement uncertainty, calibration and measurement capability, uncertainty budget.*

УДК 389.14:53.083

С.Ф. Левин

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Россия

**«НОВЫЕ» «ПОЯСНЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ»
К «РУКОВОДСТВУ ПО ВЫРАЖЕНИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ»**

С нормативно-математической точки зрения проведен анализ МИ 3281–2010 ГСИ. Оценка результатов измерений – Пояснения к «Руководству по выражению неопределенности измерений».

Ключевые слова: *невозможность использования методов оценки неопределенности GUM.*

Введение

Появление в 1999 году безупречного с литературно-художественной точки зрения и выполненного из самых лучших побуждений перевода на русский язык «Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement» [1] (далее – GUM) метрологическим сообществом России было встречено неоднозначно [2 – 6]. Одни специалисты быстро изменили свою точку зрения [7], а другие специалисты были возмущены от «чрезмерной торопливости буквально навязывания силой нового понятия» [8].

Ситуация осложнена тем, что ряд недостатков GUM указан в его тексте, правда, с использованием омонимической терминологии, создающей впечатление объективности рассмотрения известных (!) вопросов теории вероятностей и математической статистики. Особенно для тех, кто в достаточной степени не знаком с этими разделами математики. Поэтому интересны не четкие достоинства GUM, а недостатки порожденных им документов.

Целый ряд недостатков GUM, точнее говоря, дефектов, отмечен в работах [9 – 20].

А в работе [21] отмечено, что «недостатки GUM объясняются с одной стороны тем, что разработка рекомендации была поручена организациям, не имеющим опыта практических измерений, а с другой стороны тем, что рекомендацию издали без должного обсуждения».

С этим замечанием трудно не согласиться.

Речь фактически идет о недостаточной компетенции тех национальных метрологических организаций, которым проект рассылался на отзыв, т.к. «специалисты, занимающиеся в этих организациях практическими измерениями, как правило, не математики и не могут оценить качество руководства, представленное на языке математики и с многочис-

ленными формулами. Те же, кто мог бы в этом разобраться, не знают практику измерений. Поэтому для оценивания качества проектов практических рекомендаций нужно организовать их рецензирование специалистами, а не организациями» [21].

Как показывает опыт внедрения отдельно взятых положений GUM в практику поверки и измерений в виде нормативных документов, даже, казалось бы, незначительные отступления от рекомендаций [1] приводят к казусам. Так, разработанный специалистами России и Украины на основе стандарта ИСО 5167 стандарт [22] использует расширенную относительную неопределенность при оценивании точности определения расхода газа.

Однако на практике расширенную неопределенность стали подменять пределами допускаемой погрешности, а метрологическая аттестация соответствующей программы расчета «Расходомер–ИСО» показала [24], что некорректная постановка измерительной задачи метрологической аттестации программного обеспечения не позволила учесть погрешности неадекватности математических моделей и погрешности трансформирования данных измерений. Так, в свидетельстве № 29605–07 о метрологической аттестации программного комплекса «Расходомер–ИСО» было указано о его соответствии требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119 [25], метрологических требований не содержащего, при отсутствии каких-либо количественных характеристик.

Когда же было обнаружено, что в сумме указанные составляющие погрешности могут превышать нормы допуска, установленные государственной поверочной схемой [26] не только для эталонов, но и для рабочих средств измерений расхода, реакция российских разработчиков программы, ее же и аттестовавших, последовала только после вмеша-

тельства Управления метрологии.

Заметим, что программа САПР «РАСХОД-РУ» Львовского Института энергоаудита и учета энергоносителей ничем не уступает программе «Расходомер-ИСО», но ее разработчики серьезнее отнеслись к отсутствию характеристик погрешности в сертификате соответствия № 06.0001.0028, выданном ВНИИМС. Они обратились в ОМЦ «Газметрология», где сертификат был дополнен ссылкой на [27] и указанием пределов относительной погрешности вычислений расхода « $\pm 0,05\%$ ».

Однако, как следует из методики аттестации [28], тестирование математической модели расхода проводилось путем использования в качестве эталонной программы Microsoft Excel [29].

Но ведь не секрет, что относительные погрешности определения только коэффициента сжимаемости газа, одного из десятка используемых в программе параметров, достигают (0,12...1,09) % [31].

Поэтому целью настоящей статьи является привлечение внимания специалистов к более аккуратному использованию нормативных документов по расчету «неопределенности измерения».

К числу таких документов относится и [32].

Общая характеристика документа

В предисловии к Рекомендации [32] указано, что она разработана на основе Руководства G 1-104 «Оценка результатов измерений – Пояснения к «Руководству по выражению неопределенности измерений», подготовленного рабочей группой № 1 JCGM на основании заключений организаций – членов JCGM (Объединенный комитет по подготовке руководств в метрологии, возглавляемый директором Международного бюро мер и весов).

Это обстоятельство и отмечено в работе [21].

Упомянутое Руководство является составной частью серии руководств, в которую входят:

JCGM 100-2008 «Оценка результатов измерений – Руководство по выражению неопределенности измерений»;

JCGM 101-2008 «Оценка результатов измерений – Дополнение 1 к «Руководству по выражению неопределенности измерений» – оценка с использованием метода Монте-Карло»;

JCGM 102 «Оценка результатов измерений – Дополнение 2 к «Руководству по выражению неопределенности измерений» – Модели с произвольным числом выходных величин»;

JCGM 103 «Оценка результатов измерений – Дополнение 3 к «Руководству по выражению неопределенности измерений» – Создание измерительных моделей»;

JCGM 105 «Оценка результатов измерений – Основные понятия и базовые принципы»;

JCGM 106 «Оценка результатов измерений – Значение неопределенности измерений для оценки соответствия»;

JCGM 107 «Оценка результатов измерений – Применение метода наименьших квадратов».

И, как утверждается в [32], если опыт подготовки документа окажется удачным, то будет целесообразно подготовить рекомендации на основании части или всего списка перечисленных документов.

Этот список должен представлять собой план создания руководств по применению методов теории вероятностей и математической статистики, не требующих специального изучения этих разделов математики. Но беда в том, что непосредственно в GUM и даже в VIM-2007 отмечено несовпадение определений терминов GUM и математики, имеющих одинаковое написание.

Так как изучение этих разделов математики является более простой задачей, чем перечисление несоответствий содержания этих документов содержанию известных учебников Киевского, Московского, Новосибирского, Санкт-Петербургского, Томского и других университетов, а также МГТУ имени Н.Э. Баумана, то ограничимся анализом нескольких пунктов 7-го раздела [32].

Описание неопределенности GUM

Так назван этот раздел [32], и мы рассмотрим в нем только два пункта.

* * *

7.2.3. Установленные GUM методы оценки неопределенности [JCGM 100:2008 (GUM) 5] применимы при определении достоверных значений неопределенности. Если измерительная функция исходных величин является линейной, а распределение вероятности для значений этих величин является распределением Гаусса, методы оценки неопределенности, приведенные в GUM, позволяют получить максимально точные результаты оценки неопределенности измерений [JCGM 101:2008 5.7]. Практическое использование данного метода возможно [JCGM 101:2008 5.8] даже в случае несоблюдения указанных условий.

7.2.4. В некоторых случаях использование методов оценки неопределенности, приведенных в GUM, не представляется возможным, например, когда:

- измерительная функция не является линейной;
- распределение вероятности для значений исходных величин является асимметричным;
- неопределенности $[c_1]u(x_1), \dots, [c_n]u(x_n)$ (см. 4.14) различаются по степени влияния [JCGM 100:2008 (GUM) G.2.2];
- распределение вероятности является либо асимметричным, либо t -распределением, но не распределением Гаусса.

Не всегда можно предвидеть возникновение подобных проблем.

* * *

Именно с этих пунктов и надо было бы начинать рекомендацию [32], чтобы читатель, интересующийся рассматриваемым вопросом и знакомый с

«теорией вероятностей», не тратил бы зря свое драгоценное время «при определении достоверных значений неопределенности». «Даже в случае несоблюдения указанных условий» «в некоторых случаях», так как в принципе НЕВОЗ «МОЖНО предвидеть возникновение подобных проблем».

1. Как можно определить достоверные значения неопределенности, если слова «достоверных значений» даже не упоминаются в GUM?

В статье [7], опубликованной в один год с переводом GUM на русский язык, под достоверностью результатов измерений предлагается понимать достоверность используемых моделей при проведении измерений. Статистические критерии не могут доказать «истинность» той или иной модели, они могут лишь констатировать, что выбранная модель не противоречит экспериментальным данным. При этом возникают известные ошибки первого и второго рода при проверке статистических гипотез. В таком случае, по-видимому, введение термина «достоверность результата измерения» оправданно и количественно может быть охарактеризовано вероятностями ошибок первого и второго рода. Таким образом, задача учета влияния неадекватности выбираемых моделей на точность результата измерения принципиально может быть решена в рамках теоретико-вероятностного подхода.

Под упомянутой выше моделью в контексте рекомендации [32] следует понимать, по всей видимости, как «измерительную функцию», так и статистику или формулу, в соответствии с которой получают значение, т.е. оценку неопределенности измерения типа A или B.

Но ведь авторы [7] прямо указали, что ошибки 1-го или 2-го рода характеризуют не количественный, а качественный результат, связанный с проверяемой гипотезой, с видом математической структуры модели, статистики или формулы.

Неужели теперь, когда эти же авторы «перешли от погрешности к неопределенности», в методиках «расчета неопределенности» появилась статистическая проверка гипотез?

А ведь это фундаментальный дефект GUM.

К нему можно присовокупить еще одно мнение авторов [7]: «Погрешность, обусловленную неадекватностью модели, оценить довольно сложно. Как правило, предполагается, что она незначима по сравнению с другими составляющими погрешности результата измерений».

2. Действительно ли методы оценки неопределенности, приведенные в GUM, позволяют получить максимально точные результаты оценки неопределенности измерений?

Читатель, знакомый с математической статистикой, в курсе, что в методе максимального правдоподобия, применяемом для оценивания параметров распределений вероятностей по статистическим данным, различным гипотезам соответствуют раз-

личные оценки (статистики) параметров рассеяния.

Более подготовленный читатель знает, что «максимальная точность» оценок связана с принятым критерием. И здесь возможны варианты.

Самый популярный критерий – квадратичный, а метод – наименьших квадратов. Они связаны с распределением Гаусса и с т.н. «нормальной» теорией – наиболее исследованным случаем в математической статистике. Однако не менее известны «особые свойства» квадратичных критериев и статистик параметров распределения Гаусса при отклонениях от гауссовости [33 – 36]. И первое из них – аномальная чувствительность к отклонениям.

Если отклонение от гауссовости представлено в виде смеси стандартизованных функций распределений Гаусса с весами $\varepsilon > 0$ и $(1 - \varepsilon)$ [38, 36]

$$F_{G+G}(x) = (1 - \varepsilon) \cdot \Phi(x) + \varepsilon \cdot \Phi(x/3),$$

причем при $\varepsilon = 0$ асимптотическая эффективность среднего квадратичного отклонения (СКО) относительно среднего абсолютного отклонения (САО) составляет 1,14. Но при $\varepsilon = 0,0018...0,5229$ она становится меньше 1, опускаясь до 0,49 при $\varepsilon = 0,0547$.

Но даже тогда, когда гипотеза «гауссовости» является обоснованной, GUM рассматривает СКО, «оцененную стандартную неопределенность типа A», как весьма ненадежную оценку. Так, «неопределенность неопределенности», возникающая по чисто статистической причине ограниченности выборки, может быть удивительно большой. Для 5 наблюдений она составляет 36%. Это и другие значения даны в Таблице Е.1 [1], которая показывает, что стандартным отклонением статистически оцененного стандартного отклонения при поверке и калибровке средств измерений пренебрегать нельзя [17].

Вместе с тем известно, что в теории вероятностей существует единственный модульный критерий согласия, а в математической статистике – метод наименьших модулей [39, 40], которые позволяют получать оценки параметров рассеяния распределений Гаусса на 30% более эффективные по модульным критериям, чем оценки метода максимального правдоподобия измерения [41].

3. Еще в 1922 году один из создателей метода максимального правдоподобия установил [42], что асимптотическая эффективность дисперсии и стандартного отклонения в случае t-распределения с ν степенями свободы составляет $[1 - 12/(\nu(\nu - 1))]$. Для $\nu = 9$, $\nu = 5$ и $\nu = 3$ это дает эффективность соответственно 83, 40 и 0% [37]! А для распределения Коши, которое является t-распределением с $\nu = 1$, стандартное отклонение вообще не существует.

Заключение

1. Переход «от погрешностей к неопределенности» в той форме, в которой он реализован серией руководств JCGM, представляет собой смену терминологии без решения статистических проблем.

2. Рекомендации JCGM противоречат стандар-

там серий ГОСТ Р ИСО 16269 и ГОСТ Р 50779.

3. Пункт 7.2.4 «Пояснений» дезавуирует GUM.

Список литературы

1. Руководство по выражению неопределенности измерения: пер. с англ. / Научный ред. проф. В.А. Слаев. – СПб: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 134 с.
2. Слаев В.А. Подходы к применению «Руководства по выражению неопределенности измерения» в России / В.А. Слаев // Измерительная техника. – 2000. – № 5. – С. 3-7.
3. Левин С.Ф. Метрология. Математическая статистика. Легенды и мифы XX-го века: Легенда о неопределенности / С.Ф. Левин // Партнеры и конкуренты. – 2001. – № 1. – С. 13-25.
4. РМГ 43-2012 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». – 20 с.
5. Тищенко В.А. О переводе и заимствовании терминологии из международных метрологических документов / В.А. Тищенко, В.И. Токачлы, В.И. Лукьянов // Измерительная техника. – 2003. – № 10. – С. 12-16.
6. Иванова А.Г. Некоторые аспекты неопределенности измеряемой величины и неопределенности измерений в термометрии / А.Г. Иванова // Измерительная техника. – 2004. – № 9. – С. 38-41.
7. Слаев В.А. Повышение качества измерений планированием измерительной процедуры / В.А. Слаев, А.Г. Чуновкина, А.В. Чурсин // Измерительная техника. – 1999. – № 10. – С. 9-13.
8. Чуйко В.Г. О влиянии новых терминов на работу практикующего метролога / В.Г. Чуйко // Измерительная техника. – 2004. – № 1. – С. 20-23.
9. Кокс М. Основные положения Приложения 1 к Руководству по выражению неопределенности в измерении / М. Кокс, П. Харрис // Измерительная техника. – 2005. – № 4. – С. 17-24.
10. Rabinovich S.G. Measurement Errors and Uncertainties: Theory and Practice / S.G. Rabinovich. – 3rd ed. – N.Y.: Springer, 2005. – 360 p.
11. Bich W. Evolution of the «Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement» / W. Bich, M.G. Cox, P.M. Harris // Metrologia. – 2006. – No 43. – P. 161-166.
12. Левин С.Ф. Неопределенность в узком и широком смысле результатов поверки средств измерений / С.Ф. Левин // Измерительная техника. – 2007. – № 9. – С. 15-20.
13. Рабинович С.Г. Навстречу новой редакции «Руководства по выражению неопределенности измерений» / С.Г. Рабинович // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: ХУПС, 2008. – Вып. 4 (71). – С. 10-14.
14. Левин С.Ф. Проблема доверительной вероятности / С.Ф. Левин // Измерительная техника. – 2008. – № 9. – С. 33.
15. Левин С.Ф. Легенда о доверительной вероятности и уровне доверия / С.Ф. Левин // Методы оценки соответствия. – 2008. – № 10. – С. 26. – № 11. – С. 36.
16. Левин С.Ф. Чего на самом деле должны опасаться ведущие специалисты по внедрению неопределенности в отечественные измерения / С.Ф. Левин // Измерительная техника. – 2009. – № 12. – С. 61.
17. Левин С.Ф. Нерешенные проблемы неопределенности / С.Ф. Левин // Главный метролог. – 2009. – № 4. – С. 15.
18. Левин С.Ф. Нерешенные проблемы Руководства по выражению неопределенности / С.Ф. Левин // Метрология. – 2009. – № 6. – С. 3.
19. Rabinovich S.G. Evaluating Measurement Accuracy: A Practical Approach / S.G. Rabinovich. – N.Y.: Springer, 2010. – 420 p.
20. Левин С.Ф. Неопределенность как параметр распределения вероятностей: Прикладная нормативно-математическая точка зрения / С.Ф. Левин // Главный

метролог. – 2010. – № 5. – С. 10.

21. Рабинович С.Г. О необходимости создания новых рекомендаций по оцениванию погрешности и неопределенностей измерений / С.Г. Рабинович // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2010. – Вып. 4 (85). – С. 23-26.
22. ГОСТ 8.586.5–2005 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 5. Методика выполнения измерений.
23. ГОСТ Р 8.624–2006 ГСИ. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки.
24. Левин С.Ф. Статистические методы и метрологическая аттестация программного обеспечения измерительных систем / С.Ф. Левин // Измерительная техника. – 2008. – № 11. – С. 14-19.
25. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119–2000 Информационная технология. Пакеты программ. Требования к качеству и тестирование.
26. ГОСТ Р 8.618–2006 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расходов газа.
27. МИ 2891–2004 ГСИ. Общие требования к программному обеспечению средств измерений.
28. ПМА 081/39.378-2007 Метрология. Компьютерная программа «САПР «РАСХОД-РУ» (версия 1.0). Программа и методика аттестации. – К.: Укрметрстандарт, 2007. – 43 с.
29. ПМА 081/39.378-2007 Компьютерная программа «САПР «РАСХОД-РУ» (версия 1.0). Программа и методика аттестации. – К.: Укрметрстандарт, 2007.
30. МИ 2955–2005 ГСИ. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений и порядок ее проведения.
31. ГОСТ 30319.2–96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.
32. МИ 3281–2010 ГСИ. Оценка результатов измерений – Пояснения к «Руководству по выражению неопределенности измерений».
33. Тарасенко Ф.П. Непараметрическая статистика / Ф.П. Тарасенко. – Томск: Изд-во Томского университета, 1976. – 292 с.
34. Смоляк С.А. Устойчивые методы оценивания / С.А. Смоляк, Б.П. Титаренко. – М.: Статистика, 1980. – 208 с.
35. Холлендер М. Непараметрические методы статистики: пер. с англ. / М. Холлендер, Д. Вулф. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 518 с.
36. Хьюбер П. Робастность в статистике: пер. с англ. / П. Хьюбер. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
37. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния: пер. с англ. / Ф. Хампель, Э. Рончетти, П. Пауссеу, В. Штаэль. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
38. Tukey J.W. A survey of sampling from contaminated distributions / J.W. Tukey // In: Contributions to Probability and Statistics. Ed. By I. Olkin. – Stanford: Stanford University Press, 1960. – P. 448-485.
39. Р 50.2.004–2000 ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения.
40. МИ 2916–2005 ГСИ. Идентификация распределений вероятностей при решении измерительных задач.
41. Левин С.Ф. Идентификация распределений вероятностей / С.Ф. Левин // Измерительная техника. – 2005. – № 2. – С. 3-9.
42. Fisher R.A. On the mathematical foundations of theoretical statistics / R.A. Fisher // Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A. – 1922. – V. 222. – P. 309-368.

Поступила в редколлегию 6.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьков-

ский национальный университет радиоелектроники,
Харьков.

**«НОВІ» «ПОЯСНЕННЯ ЗА ОЦІНКОЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ»
ДО «КЕРІВНИЦТВА ПО ВИРАЗУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ»**

С.Ф. Левін

З нормативно-математичної точки зору проведено аналіз МІ 3281–2010 ГСИ. Оцінка результатів вимірювань – Пояснення до «Керівництва по виразу невизначеності вимірювань».

Ключові слова: *неможливість використання методів оцінки невизначеності GUM.*

**«NEW» «EXPLAINING BY ESTIMATION OF RESULTS OF MEASUREMENTS»
TO «GUIDANCE ON EXPRESSION OF THE MEASURING VAGUENESS»**

S.F. Levin

From the normatively-mathematical point of view the analysis of MI 3281–2010 GUM. An estimation of results of measurements is Explaining to «Guidance on expression of vagueness of measurements».

Keywords: *impossibility of the use of methods of estimation of vagueness of GUM.*