

# КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ФЕНОМЕН «1985-1986»: РАСЧЁТЫ ТОЧНОСТИ

## CATASTROPHICAL PHENOMENON «1985-1986»: COMPUTING OF ACCURACY

Левин С.Ф. (S. Levin), д.т.н., профессор, зав. кафедрой метрологии и метрологического обеспечения МИЭИ



### ВВЕДЕНИЕ

«Катастрофический феномен 1985–1986 годов» стал беспрецедентным по масштабам синхронным возникновением отказов авиационной, космической, ракетной, ядерно-энергетической и других видов сложной техники, эксплуатация которой требует систем измерительного контроля и управления на основе вычислительных машин со специальным программным обеспечением [1]. Расследование выявило среди причин феномена катастроф погрешности измерений, статистического оценивания и прогнозирования, а также погрешности математических моделей объектов, реализуемых программами вычислений.

Задолго до этого А.Н. Колмогоров доказал теорему о расстоянии между статистической функцией распределения и гипотетической функцией распределения вероятностей, Н.А. Бородачёв ввёл вероятностные оценки достоверности измерительного контроля, а Дж. Уолш, С. Уилкс и Г. Роббинс получили формулу для доли  $\gamma$  непрерывного распределения, сосредоточенной с вероятностью  $\beta$  в границах толерантного ( $\beta, \gamma$ )-интервала,

$$\beta = 1 - N \cdot \gamma^{N-1} + (N-1) \cdot \gamma^N.$$

ГОСТ 16263–70 [2] определил термин «истинное значение физической величины» как «значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину», но что значит «идеальным образом в качественном и количественном отношении» долгое время оставалось загадкой.

ГОСТ 8.207–76 [3] определял результат измерения как среднее арифметическое результатов наблюдений, отмечая, что границы погрешностей надо вычислять построением композиции составляющих, а при отсутствии данных о виде распределений — принимать их равными. Но место композиции за-

няла приближённая формула, погрешности которой из-за пренебрежения одной из составляющих погрешности результата не превышали 15%. Пояснение было дано спустя 11 лет: «Для нахождения погрешности результата измерения надо построить композицию распределения случайных и неисключённых систематических погрешностей. Но построение композиции затруднено, поэтому используют эмпирическую формулу расчёта доверительной погрешности результата  $\Delta(P) = t_\gamma \cdot S_\Sigma$ , (6.17), где  $t_\gamma = [\theta(P) + \varepsilon(P)] / [S(\bar{A}) + \theta / \sqrt{3}]$  — коэффициент, соответствующий  $q$ -му уровню значимости композиции распределений случайных и неисключённых систематических погрешностей;  $S_\Sigma = \sqrt{S^2(\bar{A}) + \theta^2 / 3}$  — СКО композиции случайных и неисключённых систематических погрешностей. Вычисление доверительной погрешности результата измерения по формуле (6.17) даёт пренебрежимо малую погрешность, не превышающую 12% (! — авт.). Однако это вычисление довольно громоздко (? — авт.)» [4].

Накануне катастрофического феномена РД 50–453–84 [5] указал, что для симметричного распределения границы интервала, в котором с вероятностью  $P$  находится погрешность средства измерений, вычисляются по формуле

$$\Delta_{\text{СИ } P} = M[\Delta_{\text{СИ}}] \pm K \cdot \sigma[\Delta_{\text{СИ}}],$$

где  $M[\Delta_{\text{СИ}}]$  — математическое ожидание,  $\sigma[\Delta_{\text{СИ}}]$  — стандартное отклонение, а для усеченной плотности распределения погрешность коэффициента  $K$  для доверительных вероятностей от 0,90 до 0,98 составляет от  $\pm 7\%$  до  $\pm 65\%$ !

В том же году в математической энциклопедии [6] появилось более общее определение термина

**ТОЛЕРАНТНЫЙ ИНТЕРВАЛ** — случайный интервал, построенный по независимым одинаково распределённым случайным величинам, функция распределения которых  $F(x)$  неизвестна, и содержащий с заданной вероятностью  $\gamma$  по крайней мере долю  $p$  ( $0 < p < 1$ ) вероятностной меры  $dF$ .

Замечательный русский метролог Петр Васильевич Новицкий сказал [7]: «Очень часто доверительные погрешности рассчитывают, вводя ничем не обоснованное предположение о том, что вид закона распределения погрешностей будто бы точно известен. Такой прием является некорректным вне зависимости от того, допускается он сознательно или неосознанно. Реальные законы распределения погрешности весьма разнообразны и часто очень далеки от нормального».

П.В. Новицкий отмечал и важность введения понятия «погрешности адекватности». А его идея о выборе вида распределения по максимуму вероятности согласия с эмпирическим распределением при статистической обработке рядов измерений, сформулированная еще в МИ 199–79 [8], не сразу была осознана. Проблема была в отсутствии статистики вероятности согласия. Её удалось получить для расстояния Колмогорова через 4 года и опубликовать в открытой печати в 1988 году.



П.В. Новицкий  
(С.-Петербург, 1997 г.)

Но даже в МИ 1967–89 [9] утверждалось, что «способы определения методической погрешности измерений, обусловленной неадекватностью принятой модели объекта измерений, относятся к наименее развитым областям метрологии. Это объясняется практическим отсутствием формальных методов установления таких моделей объектов измерений, которые строго адекватны объектам и задачам измерений. Поэтому определение данной методической погрешности измерений требует не только высокой квалификации, но также опыта и инженерной интуиции разработчиков МВИ».

На 1985 год пришлось рекордное число авиакатастроф, в крупнейшей из них погибло 520 человек. Обследование 72 «Боингов» в 46 авиакомпаниях мира установило, что периодичность их осмотров с момента начала эксплуатации возросла в несколько раз. Для обоснования этого использовались программы FMEA и... миллиардные прибыли от экономии на техническом обслуживании за счёт безопасности.

В 1986 году нобелевский лауреат физик Ричард Фейнман высмеял расчёты по программе FMEA, согласно которой катастрофический запуск многоразового космического корабля США Challenger должен приходиться на 10000 запусков. Расследование установило, что по данным испытаний и моделирования по программе CORDS, для которой погрешности расчёта динамических характеристик Space Shuttle оценивались в границах 20%, датчики ускорений были заменены системой косвенного контроля. В 10-м последнем для Challenger запуске 28 января 1986 года эта система аварийный сигнал не подавала, хотя по данным траекторных измерений правый ускоритель после старта развивал тягу на 4% меньше расчетной, а дымовое пятно в нижней части ускорителя (см. фото) на телевизионных кадрах появилось через 0,678 секунды после зажигания [1].

До катастрофы на Чернобыльской АЭС программы типа FMEA ещё предполагалось заменить программами типа PRA, успешно использовавшимися в ядерной энергетике.

В 1986 году Международный комитет мер и весов рекомендовал участникам международных сличений и работ под его эгидой выражать суммарную неопределённость типа A и неопределённости типа B стандартным отклонением.

В том же году вышли новые методические указания по расчёту погрешностей измерений МИ 1552–86 [10], их дополнили МИ 2083–90 [11].

Отрыв определения термина «измерение» от корня слова с распространением на «непрямые измерения» породило катаклизмы<sup>1</sup> и «общую теорию измерений» — косвенных, совокупных, совместных, абсолютных и относительных. Их дополнили равноточные, неравноточные, однократные, многократные, статические и динамические «измерения», хотя ещё в отъёме на проект [13] отмечалась некорректность определений «измерений», терминов и формул для рядов измерений. Реакция на эти замечания ограничилась примечанием к термину «прямое измерение»: «строго говоря, все измерения прямые». А к концу XX-го века «виды» измерений расширились статистическими, векторными, тензорными и даже мягкими.

Выдающийся русский метролог Вениамин Алексеевич Кузнецов (сегодня его можно открыто называть отцом советской военной метрологии) в связи с этим сказал: «Мы перестали понимать, что такое измерение».

<sup>1</sup> КАТАХРЕЗА [*гр. katachresis* злоупотребление] — соединение противоречивых, несовместимых понятий, например, «электрическая конка». Обычно представляет собой ошибку речи, но в некоторых случаях входит в обиход, например, «красные чернила». Такие выражения становятся возможными потому, что перестает осознаваться внутренняя форма соответствующего слова, например, связь слова «чернила» со словом «черный» [12].



**В.А. Кузнецов**  
на семинаре в МИЭИ

Вопреки классификации МИ 2222–92 [14], понятию «измерения» была угрожена судьба кибернетики: её тоже распространяли на всё. В.А. Кузнецов сразу оценил возможности практического применения теории измерительных задач как теории математических задач, решаемых путём измерений и вычислений с учётом не только погрешностей измерений, но и статистики погрешности неадекватности математических моделей. Сотрудники созданного по его инициативе метрологического центра министерства обороны вошли в состав научной группы, разрабатывавшей приложения теории измерительных задач.

Прообразом этой теории была вышедшая в 1962 году монография Ю.В. Линника «Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений», анализировавшая результаты «непрямых измерений» в рамках математической статистики. Не были учтены погрешности измерений, а на погрешности неадекватности внимание обратили только в ходе расследования катастрофического феномена 1985–1986 годов. Тогда теория измерительных задач помогла выявить эти факторы катастроф и их связь с периодичностью контроля техники.

Это позволило корректировать межповоротные интервалы войсковых средств измерений путём прогнозирующего контроля. Его приняли ВНИИ-МИСП, ЦНИИРТИ и ряд конструкторских бюро. А система прогнозирующего метрологического сопровождения ПОРКАТ ускорила затянувшуюся международную сертификацию ИЛ 96–300.

Пригодился и опыт 1970-х годов, когда военные специалисты в области контроля и надёжности решили проблему периодичности проверок бортового оборудования ракетной техники. Но тогда успехи теории измерительных задач больше связывались с точностью наведения.

### ПРОБЛЕМА № 1 ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕТРОЛОГИИ

В центральную проблему отечественной метрологии «истинное значение физической величины» превратило «философское» примечание в [13]: «Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Оно может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений».

Смысл «идеальным образом в качественном и количественном отношении» примечание к термину, взятому из [2], не раскрывало, но было заявлено:

«Поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то на практике пользуются ее действительным значением». Оно определялось как «значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него» [13].

Но, если истинное значение неизвестно, как узнать, насколько именно близко к нему действительное значение?

Терминологическую «пустоту» заполнило «Руководство по выражению неопределённости измерения» (английская аббревиатура GUM) [15], подготовленное анонимными международными экспертами. GUM рекомендовал отказаться от неизвестных «истинного значения физической величины» и «погрешности измерения», заменив их средним арифметическим для «ряда результатов измерений» и нетрадиционным для метрологии параметром: «неопределённость (измерения) есть параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли быть обособанно приписаны измеряемой величине» [15].

Удивительно не то, что параметр, «который характеризует дисперсию», это сама дисперсия или стандартное отклонение как корень квадратный из дисперсии, а их статистическими оценками являются средний квадрат отклонения от среднего арифметического и «среднее квадратичное отклонение» (СКО) в ряду измерений.

Удивительно то, что GUM [15] представили новым этапом развития метрологии, а его усиление дополнениями и пояснениями [16–20] обернулось примерами доходящего до казусов некорректного применения статистики. В оправдание этого было отмечено, что «доверительная вероятность» и «уровень доверия» в GUM не соответствуют одноимённым терминам математической статистики. А «расширенная неопределённость» и «интервал охвата» — не tolerance interval математической статистики.

Общим у GUM и книги [4] было положение о «громоздкости» вычислений «объединения» распределений вероятностей (для композиции и, следовательно, для толерантного интервала). Но в GUM для обоснования «простых» формул были привлечены центральная предельная теорема теории вероятностей и распределение Стьюдента.

И в этом же 1999 году энциклопедия [21] уточнила: Толерантный интервал (tolerance interval) — интервал со случайными границами, построенный по выборке таким образом, что он с заранее выбранной вероятностью содержит не менее заданной доли вероятностной массы непрерывного распределения, которому подчиняются элементы вы-



борки. Однако ГОСТ Р 50779.10-2000 [22] назвал *tolerance interval* «допустимым интервалом», а ГОСТ Р 50779.11-2000 [23] — «полем допуска». Так отечественная метрология потеряла толерантный интервал, а его доверительные границы в государственных поверочных схемах многие до сих пор считают границами доверительных интервалов. Но в математической статистике доверительные интервалы характеризуют точность оценивания параметров распределений величин, а не величин.

Другими словами, в отношении погрешности доверительный интервал для среднего арифметического характеризует не случайную, а систематическую составляющую.

Нормативно ситуацию прояснила статистика погрешности неадекватности математических моделей объектов измерений Р 50.2.004-2000 [24].

«Погрешность, обусловленная несоответствием модели объекту измерений», рассматривалась и ранее. Так, согласно МИ 2091-90 [25], она «не должна превышать 10% от предела допускаемой погрешности измерений».

Погрешность неадекватности нужно учитывать в композиции наравне с другими составляющими. Но это было уже за рамками традиционной логики статистического вывода: критерии согласия, оценен расхождение эмпирического и гипотетического распределений, в принятой гипотезе эту оценку не учитывали.

Действие этого дефекта ослаблял т.н. достигнутый уровень значимости. Преодолеть же его позволило соединение теоремы Колмогорова, формулы Уолша-Уилкса-Роббинса и теоремы о связи расстояния Колмогорова с вероятностью согласия [24]. Тогда и выяснилось, что в государственных поверочных схемах указаны границы именно толерантных интервалов, тоже характеризующие доверительными вероятностями.

GUM пошушу назвали «Руководством по выражению дисперсии измерения». Его перевод вызвал длительную и бесплодную дискуссию. И в её пылу не все обратили внимание на указанное открытым текстом положение GUM о невозможности его непосредственного применения в государственных поверочных схемах из-за нарушения принципов доверительного оценивания (подробнее см. [26-34]).

Неожиданностью здесь стала критическая оценка основания GUM на центральной предельной теореме ведущих специалистов Национальной физической лаборатории Великобритании [27].

Проблемы в расчётах GUM обнаружили сразу же после выхода его перевода [15].

В примере калибровки термометра [15], иллюстрирующем главную идею GUM о том, что «при указании значения измеряемой величины необходимо давать ее наилучшую оценку и наилучшее оценивание неопределённости

этой оценки», GUM и традиционная теория погрешностей методом наименьших квадратов дают решения в виде линейных моделей и совпадающие до 4-го знака после запятой поправки. Однако учёт погрешности неадекватности, согласно [24], дал параболическую модель в 1,6 раза более точную, а расчётные значения тока по данным измерений напряжения и сопротивления в случае распределения Гаусса дают распределение Коши, дисперсия которого и, значит, «неопределённость измерения», не существует [35].

В этом же году профессор Л.К. Исаев предложил использовать GUM только в тех видах измерений, где отсутствуют государственные поверочные схемы [36]. Это дополняло рекомендации Международного комитета мер и весов 1986 года, не требуя её распространения на все измерения и «измерения» «выкручиванием рук при введении нового понятия» [37].



Л.Н. Брянский и Л.К. Исаев с супругой на одном из юбилеев журнала

Тем временем число проблемных расчётов характеристик погрешности нарастало.

В 2002 году в лаборатории средств измерений массы ГЦИ СИ РОСТЕСТ-Москва была проведена метрологическая аттестация методики поверки набора гирь класса точности E2 на основе расчёта с учётом погрешности неадекватности композиции распределений составляющих [38] установила, что набор следует понизить в классе до F1.

Показательным оказался в ГОСТ Р 50.2.028-2003 [39] пример расчёта методом наименьших квадратов 95%-й «расширенной неопределённости» градуировочной характеристики хроматографа, в которую вошло только 12 из 35 градуировочных точек [40]. Несоответствие было настолько явным, что на международном семинаре во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева автор доклада о новых методиках измерений физико-химического состава и свойств веществ торопливо заявил: «Этот документ разрабатывал не наш отдел».

В 2004 году анализ показал, что в примере расчёта из МИ 2083-90 на основе гипотезы «нормальности» для частного полученные оценки смещены, а точность результатов существенно завышена [41].

В 2005 году появилась методика расчёта композиции распределений МИ 2916-2005 [42] и стандарты по статистическим методам ГОСТ Р ИСО 16269-6-

2005 [43] и 16269-8-2005 [44], которые сначала не вызвали интереса у метрологов. Теперь согласно ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005 толерантный интервал (*tolerance interval*): Интервал, определённый по случайной выборке таким способом, что можно утверждать с указанным уровнем доверия, что интервал содержит не менее чем заданную долю совокупности.

*Примечание — Уровень доверия в этом случае — предел доли интервалов, определенных указанным способом, которые будут включать в себя не менее чем заданную долю совокупности, при бесконечном увеличении повторений метода.*

Не обошлось без казуса: в приложении G [43] формула Уолша-Уилкса-Роббинса была дана с ошибкой, что делало вероятность  $\beta$  отрицательной.

Так «перестройка» отечественной метрологии к неопределённости, которую ведущие теоретики от метрологии решили распространить на всё, зашла в вероятностно-статистический тупик [45, 46].

### ЗАКРЫТЫЙ ПЕРЕЛОМ ИЛИ ГРАБЛИ В МЕТРОЛОГИИ?

Понимание происходящего в отечественной метрологии при «единстве измерений» как *traceability* [13] наступило не сразу и, конечно, не в связи с введением МИ 2916-2005 [42] методики расчёта композиции распределений.

Потоком массовых отказов сложных видов нормативных документов или пиком катастрофических противоречий стали события 2006 года.

В статье [47] ведущих метрологов ВНИИФТРИ утверждалось о том, что формулы МИ 1552-86 и МИ 2083-90 для доверительной границы погрешности результата измерения неверны.

В браковочном условии методики поверки термометров ГОСТ Р 8.624-2006 [48] появилась расширенная неопределённость, тогда как ГОСТ Р ИСО 10576-1-2006 [49] указал: «Устанавливаемые предельные значения не должны включать в себя (в явном или неявном виде) неопределённость измерений».

Ещё к проекту методики поверки [48] возникли вопросы по рассеянию в ряду измерений и примеру расчёта неопределённости измерения.

В статье [28] было указано его несоответствие ГОСТ Р 50779.21-2004 [50] и отмечено, что внедряемые в нормативные документы по методикам поверки расчёты GUM не занижают, а завышают оценки точности результатов измерений по ряду причин:

- суммарная стандартная неопределённость не является состоятельной оценкой параметра рассеяния композиции негауссовых распределений;
- «уровень доверия стандартных неопределённостей типа A» не согласован с нормами доверительной вероятности поверочных схем;

- не учитывается неопределенность функции распределения вероятностей искомой при поверке величины и её неадекватность;
- расширенная неопределенность не учитывает усечения реальных распределений.

Это вызывает сомнения в корректности выбора эталонов и состоятельности «оценённой неопределённости».

Принятое в методиках поверки браковочное условие по максимуму абсолютного значения случайной составляющей погрешности предпочтительнее расширенной неопределенности. В методе максимума правдоподобия эта логика принятия решения эквивалентна выбору не распределения Гаусса с расчётом по среднему арифметическому и СКО, а равномерному распределению [3, 5, 51, 52].

И только после статьи [28] последовала реакция «главных специалистов по внедрению неопределенности в отечественные измерения», если не считать неудачных попыток не допустить публикации статьи: «Следует признать, что толерантные интервалы, несправедливо не получившие широкого распространения при обработке данных в метрологии, могли бы эффективно использоваться, на наш взгляд, в тех ситуациях, когда надо охарактеризовать разброс некоторой совокупности данных, например, результатов измерений продукции при ее выборочном контроле и т.д. Однако

нельзя согласиться с их применением при обработке данных калибровки в примере, рассматриваемом в [28], поскольку в этом случае определяется МХ конкретного СИ и результатом является ее оценка с соответствующей неопределенностью».

Иначе, присовокупить к «МХ конкретного СИ» неопределённость можно, а толерантный интервал — нет [53].

И дело не в несправедливости, а в понимании учебников и книг по статистике.

Так, из книги П. Хьюбера [54] в МИ 2174–91 [55] вместо примеров погрешности трансформирования погрешностей переключали примеры «робастности». Хотя согласно [55] целью метрологической аттестации алгоритма (программы) является «исследование точностных свойств алгоритма в рамках конкретной измерительной задачи», где «в результате метрологической аттестации получают оценки характеристик составляющих погрешностей результатов обработки». Ведь погрешности измерений статистических рядов данных, трансформированные в результаты обработки, ненаблюдаемы.

1 ноября 2006 года введён в действие ГОСТ Р ИСО 10155–2006 [56], в котором толерантные интервалы были связаны с границами погрешности градуировочной характеристики пылемера: толерантный интервал (tolerance interval): Интервал, имеющий нижнюю и верхнюю границы, в котором опреде-

ленная доля совокупности лежит при заданном уровне доверия.

Не обошлось без казусов и здесь. Так, термин «градуировочная функция (calibration function): Функциональная зависимость показаний прибора от некоторого измеримого свойства массовой концентрации частиц, представленной референтным ручным методом (см. ИСО 9096) при условии постоянства всех влияющих величин» больше подходит для функции преобразования пылемера. В этом случае градуировочной будет обратная функция, т.к. измеряемое свойство массовой концентрации частиц оценивают по показаниям уже отградуированного прибора.

В той же последовательности должна решаться и измерительная задача градуировки пылемера. С этим связана путаница в обозначениях «х» и «у» в таблице данных испытаний и уравнении линии регрессии в примере расчёта. Эта путаница допустима в том случае, когда «прямая» и «обратная» функции совпадают.

Кроме того, градуировочный график из [56] построен без учёта погрешности неадекватности принятой модели и без согласования с нормами доверительной вероятности [57]. К тому же в [57] доверительная вероятность 0,99 приписана расширенной неопределенности, которая даже согласно GUM интервальной оценкой не является.

*(Продолжение следует)*

В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ФОРУМА «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. АВТОМАТИЗАЦИЯ»



## РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

XIII МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

- Электронные компоненты
- Комплектующие
- Печатные платы
- Светотехника
- Материалы
- Конструктивы
- Технологии
- Промышленное оборудование и инструменты
- Контрольно-измерительные приборы и лабораторное оборудование

**30 октября – 1 ноября 2013**

Санкт-Петербург, СКК

Организаторы выставки:

radel radel2@orticon.com, www.farexpo.ru/radel  
тел.: тел.: +7 (812) 777-04-07, 718-35-37

Место проведения: Санкт-Петербург, СКК, пр. Ю. Гагарина, 8, м. «Парк Победы»



# КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ФЕНОМЕН «1985-1986»: РАСЧЁТЫ ТОЧНОСТИ

## CATASTROFICAL PHENOMENON «1985-1986»: COMPUTING OF ACCURACY

Левин С.Ф. (S. Levin), д.т.н., профессор, зав. кафедрой метрологии и метрологического обеспечения МИЭИ

(Окончание, начало см. № 3-2013)

В 2008 году в оригинале и подлиннике МИ 1747–87 [58] и в проекте стандарта по поверке гирь в общем примере расчета погрешности определения массы гири класса точности  $F_1$  при одних и тех же исходных данных все результаты оказались разными [29].

В этом же году метрологическая экспертиза МИЭИ и «РОСТЕСТ–Москва» результатов сличений программ расчета расхода газа [59] согласно ГОСТ 8.586.5–2005 [60] показала [61], что внедрение в эти расчеты расширенной неопределенности и «уровня доверия» GUM некорректно.

Дело не только в том, что для объемного расхода газа ГОСТ Р 8.618–2006 [62] нормирует пределы допускаемых относительных погрешностей: им соответствует доверительная вероятность  $P=1$  [51].

Расчеты в режиме схемы приведения [41] по программе «Расходомер ИСО» композиции погрешности расчета расхода газа по данным измерений узла учета показали:

- при вводе в данные характеристик погрешностей измерений относительная погрешность расчета во многих случаях превышает 4%, что согласно [62] недопустимо для рабочих средств измерений, тогда как расширенная неопределенность в эти границы укладывается;
- наибольший вклад в композицию погрешности расчета расхода газа вносит трансформированная инструментальная составляющая, что требует повышения точности измерений на порядок;
- метрологическая аттестация программы «Расходомер ИСО» разработчиком не указала параметрическую составляющую погрешности неадекватности, немногим уступающей инструментальной;
- программа содержит более десятка физических параметров газа, пределы относительных погрешностей определения только одного из них, коэффициента сжимаемости, составляют 0,12...1,09%, тогда как в сертификате соответствия на аналогичную программу САПР «РАСХОД-РУ» фигурирует погрешность вычислений не более 0,05%.

Первыми на необходимость повышения точности измерений расхода обратили внимание поставщики газа, и потребовали этого от промышленных

потребителей, а те, чтобы не платить громадные штрафы за недобор, стали сжигать газ в атмосферу.

Проблему закрыли новые датчики давления типа «Метран», повысившие точность измерений более чем в 9 раз.

Однако упомянутая выше почти 50%-я, но оцененная лишь в «0,05%», параметрическая погрешность неадекватности в методике расчета расхода газа осталась.

Так совпало, что когда в ГОСТ Р 8.648–2008 [63] появился «предел допускаемых относительных доверительных погрешностей при доверительной вероятности 0,95» и почти то же самое — в ГОСТ Р 8.663–2009 [64], ведущий специалист одного из ведущих институтов по температурным и теплотехническим измерениям на своем сайте заявила о том, что она не понимает смысла доверительных границ погрешности образцовых средств измерений.

И в последний рабочий день 2009 года руководство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии решило инициировать для метрологов, специалистов и преподавателей, программу «Статистические методы решения измерительных задач» на базе МИ 2916–2005. И 9 сентября 2010 года она была утверждена.

Объективно это решение вызвано критическим состоянием метрологического обеспечения с 1990-х годов, невосполнимыми потерями опытных специалистов старшего поколения, снижением общего уровня метрологической и математической подготовки разработчиков нормативных документов.

А 11 октября 2010 года в РМГ 29–99 было внесено Изменение № 2, необходимость которого со времен дискуссии по проблемам применимости вероятностно-статистических методов 1970–1980-х годов с участием Ю.И. Алимова, В.Н. Тутубалина, В.В. Налимова, Л.С. Понтрягина, П.Е. Эльсберга, Дж. Тьюки, Ф. Мостеллера, П. Хьюбера, И. Вучкова и Ф. Хампеля [65–67], стала «притчей во языцех». Эта притча трансформировалась в известную шутку о средней температуре по больнице.

Изменение № 2 затронуло названия и определения терминов для рассеяния рядов измерений. «Среднюю квадратическую погрешность результата измерений среднего арифметического» заменила «характеристика рассеяния среднего арифметического значения результатов измерений», что ближе к известному в статистике «СКО оценки

параметра положения». Формулы для СКО тоже подправили.

Так в отечественной метрологии было восстановлено СКО ряда измерений и СКО оценки стандартного отклонения параметра положения.

Перемена названий составляющих погрешности Изменением № 2 стала признанием того, что коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, \nu}$  использовался в ряде нормативных документов не по назначению. Он входит в формулу для доверительных границ оценки параметра положения совокупности и характеризует неисклѳченную систематическую, а не случайную составляющую композиции. А о точности оценки параметра рассеяния судят по коэффициентам доверительных границ на основе распределения  $\chi^2$  [50].

В 2011 году было принято решение заменить с 1 января 2013 года ГОСТ 8.207–76 на ГОСТ Р 8.736–2011 [68]. В нем «среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений» стало «оценкой измеряемой величины». На замечание о наличии строгих формул для композиции равномерных распределений число слагаемых при «арифметическом» суммировании параметров рассеяния было снижено до 2-х.

В 2012 году поток метрологических казусов возрос.

С 1 января введен в действие ГОСТ 8.381–2009 [69]. В нем дан заимствованный из РМГ 43–2001 [16] пример расчета по эмпирическим формулам точности вторичного эталона единицы длины, штрихового метра. Здесь доверительная граница погрешности штрихового метра  $\Delta_z(0,95)$  при доверительной вероятности  $P=0,95$  и расширенная неопределенность измерений  $U(0,95)$  при уровне доверия 0,95 по данным поверки на государственном первичном эталоне оценены  $\Delta_z(0,95) = 0,0713 \approx 0,07$  [мкм] и  $U(0,95) = 0,068 \approx 0,07$  [мкм].

В государственной же поверочной схеме средств измерений длины [70] доверительная вероятность установлена равной 0,99. Расчет по композиции показал, что оценка границы доверительной погрешности занижена на 79%!

С 1 июля введен в действие стандарт ГОСТ OIML R 111–1–2009 [71]. В нем дан заимствованный из МИ 1747–87 [58] уже упоминавшийся выше пример расчета массы эталонной гири класса точности  $F_1$  с ошибками в формулах и «не совсем» удачной подгонкой под правильный результат. Расчет на осно-

ве композиции подтвердил, что согласно данным примера гиря должна быть забракована.

1 октября был введён в действие ГОСТ Р 54500.3–2011 [72], дубль GUM с рядом отличий:

- dispersion заменил разброс;
- совокупности значений разделены на генеральные и выборочные;
- исправлены определения терминов tolerance interval и им «вернуло» доверительную вероятность: Доверительная вероятность (confidence coefficient, confidence level) — Значение  $(1-\alpha)$  вероятности, связанной с доверительным или толерантным интервалом.

Толерантный интервал (statistical coverage interval) — Интервал, для которого можно утверждать с определенной доверительной вероятностью, что он содержит долю генеральной совокупности, не меньшую заданной.

Но кто виноват в «искажении» определений терминов?

Для ответа на этот вопрос специалисты ВНИИМС предоставили английский текст ISO/IEC GUIDE 98-3:2008(E): confidence coefficient, confidence level — The value  $(1-\alpha)$  of the probability associated with a confidence interval or a statistical coverage interval.

statistical coverage interval — An interval for which it can be stated with a given level of confidence that it contains at least a specified proportion of the population.

NOTE 2 Also called «statistical tolerance interval». This term should not be used because it may cause confusion with «tolerance interval» which is defined in ISO3534-2:1993.

Это NOTE 2 и «пропало».

Другими словами, зарубежные разработчики GUM и его редакции 2008 года тоже оказались не в курсе, что такое толерантные интервалы.

В безграмотность же авторов книг по статистике из библиографии GUM и, естественно, [72], верится с трудом.

Исправление ошибок перевода и определения термина «толерантный интервал» для одних сделало более очевидными статистические дефекты GUM. А для других ситуация с применением концепции неопределённости в государственных поверочных схемах ещё больше запуталась.

С 1 ноября введены в действие МИ 3379–2012 [73], в которых расчёт погрешностей поверки основан на композиции распределений составляющих погрешности с учётом погрешностей неадекватности для принятой функции распределения вероятностей — функции эквивалентного равномерного распределения. Было установлено, что эта неучтённая составляющая погрешности при поверке счётчиков-расходомеров на многопозиционных установках может достигать 50% допуска. Анализ данных эксперимента

на установке ВНИИМ имени Д.И. Менделеева подтвердил наличие явления неидентичности поверочной среды для многопозиционных рабочих столов и при наблюдениях геометрии трубопроводов по ГОСТ 8.586–2005.

В 2012 году произошло ещё и знаменательное для метрологии событие.

Знамя ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, которая последние годы называлась ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, сдано Воронежскому авиационному техническому университету. Со знаменем исчезли и знаменитые собаки<sup>1</sup>, которые раньше сторожили чёрный ход Петровского путевого дворца, а после «изъятия» дворца у академии странным образом «перекочевали» к парадному входу в новый главный корпус.



Вместе с академией перестала существовать и кафедра, готовившая военных инженеров-метрологов и специалистов-метрологов высшей квалификации для России, СНГ и дружественных стран дальнего зарубежья.

Выпускников кафедры, в многолетнюю подготовку которых по новейшим учебным программам были вложены огромные средства и передовой опыт военной метрологии, заставили на первом же году службы писать рапорта об «увольнении по собственному желанию», грозя...

«Эффективный чиновник», которому «наука в армии не нужна», своё дело сделал. Системная подготовка инженеров-метрологов и метрологов высшей квалификации в министерстве обороны прекратилась. Не лучший период переживает и 32 ГосНИИ. А ведь без своей метрологии любая страна превращается в лавку колониальных товаров.

Нашу военную метрологию в Воронеже «заморозили» на кафедре криогенной техники, преподавать её на современном уровне некому. В этом убедились представители этой кафедры в МИЭИ и лабораториях «РОСТЕСТ–Москва».

Неужели метрологические службы полков, «не кто-нибудь, сержант поды-

мет», который по уровню подготовки — «метеоролог» для отслеживания направления «ветра».

А ведь ранее обещали 10 миллиардов рублей на новые корпуса вблизи Москвы. Где они, неизвестно, а сохранение опыта и профессорского состава кафедры взял на себя Московский метрологический межкафедральный семинар МИЭИ и РОСТЕСТ–Москва, в работе которого принимают участие ведущие метрологи НИИ и ВУЗов Москвы.



Семинар по метрологической аттестации программного обеспечения. Первый слева — Н.Ф. Трубицын<sup>2</sup>

С 1 января 2013 года введён в действие ГОСТ 8.740–2011 [74], согласно которому «относительная погрешность вычислений объемного расхода и объема газа при стандартных условиях, выполняемых средствами обработки, по заданным параметрам газа и объемному расходу газа при рабочих условиях, обусловленная алгоритмом вычислений и его программной реализацией, не должна превышать  $\pm 0,05\%$ ». Тех самых  $\pm 0,05\%$ !

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблему толерантности и проблему качества нормативных документов в метрологии создало отсутствие осознания внутренней формы слов русского языка и её связи с языком математики, что отразилось, прежде всего, на примерах расчёта точности в нормативных документах. И это несмотря на то, что лучшее из определений «единства измерений» даёт РМГ 29–99<sup>3</sup>.

Это — «состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражают в узаконенных единицах физических величин, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы».

Поэтому истинное значение физической величины, хоть и условное, является аналогом относительной истины

<sup>2</sup> Двухпараметрическое распределение Трубицына аппроксимирует таблицы «нормального закона» с погрешностью не более  $1,4 \cdot 10^{-4}$ .

<sup>3</sup> Летом 2012 года на Международном семинаре во ВНИИМ имени Д.И. Менделеева профессор В.А. Слаев пообещал прислать новую редакцию РМГ 29–99. Правда, трёх лет с тех пор ещё не прошло.

<sup>1</sup> А они неотъемлемая часть чего?



и результатом измерения государственным первичным эталоном как наиболее точным законным средством измерения в данном виде.

Проблему «истинного значения» в XVIII веке закрыл ещё Л. Эйлер: «При определении или измерении величин всякого рода устанавливается некоторая известная величина этого же рода, именуемая мерой или единицей и зависящая исключительно от нашего произвола. Затем определяется, в каком отношении находится данная величина к этой мере».

Физический размер меры единицы измерения не связан с её номинальным значением, а физические размеры реперных мер при построении шкал относительно устанавливаются методом калибровки. И даже намечаемый переход к системе единиц на основе фундаментальных физических констант согласно идее П. Дирака не противоречит идее Л. Эйлера.

Примечание к термину «истинное значение физической величины» в [13] — ошибочно. Статус действительного значения величины может иметь результат решения метрологической измерительной задачи [24], для которого размерами наикратчайшего толерантного интервала относительно нормы доверительных границ, установленных для решаемой измерительной задачи, можно пренебречь.

И, наконец, отображение математической моделью связей между свойствами объекта измерений «в качественном отношении» — структурой и составом переменных, а «в количественном отношении» — оценками параметров. Это отображение становится идеальным при балансе параметрической и структурной составляющих погрешности неадекватности, что соответствует мини-

муму их суммы и различий между измеренными и расчётными значениями переменных модели [24]. Нарушение баланса ведёт к известной в математической статистике стохастической мультиколлинеарности [75].

Цепочка из «философского» примечания, неполноты формулы Тейлора для погрешности и «закона распространения неопределенности», отсутствия знаний статистики, прикритого боязнью громоздкости расчётов композиции как «оттого, что в кузнице не было гвоздя», поставила отечественную метрологию перед выбором.

Следовать ли рецептам «Руководства по выражению неопределенности измерения» или, ограничив его применение международными сличениями, сохранить единство измерений и вычислений?

В свете последних событий вопрос приобретает ещё и дополнительную формулировку. «Неопределенность измерения», распространяемая на всё, — это некомпетентность или вредительство?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Левин С.Ф. Погрешности измерений и вычислений как причина «катастрофического феномена 1985-1986 годов» в авиационной и ракетно-космической технике. Контрольно-измерительные приборы и системы. 2000. № 3. С. 21–24.
2. ГОСТ 16263–70. ГСИ. Метрология. Термины и определения.
3. ГОСТ 8.207–76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
4. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. Л.: Лениздат, 1987.

5. РД 50-453-84 Методические указания. Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета.
6. Математическая энциклопедия: т. 5. Слу – Я. М.: Советская энциклопедия, 1984.
7. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985.
8. МИ 199–79. ГСИ. Методика установления вида математической модели распределения погрешностей.
9. МИ 1967–89. ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения.
10. МИ 1552–86. Методические указания ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений. ☐

С полным списком литературы можно ознакомиться на сайте [www.kipis.ru](http://www.kipis.ru).

*«The catastrophic phenomenon of 1985-1986» was unprecedented because of numerous waivers from the use of aviation, space, missile, nuclear power and other types of complex equipment which operation requires measuring control systems based on computers with special software installed. According to the research one of the reasons for such catastrophic phenomenon was errors of measurement, static evaluation as well as the mathematical models of the objects implemented with the calculation programs. Find more details in the article written by D.Eng., Professor Levin S.F.*

#### НОВОСТИ на [www.kipis.ru](http://www.kipis.ru)

##### НОВАЯ ВЕРСИЯ ONETOUCH AT

Компания **Fluke Networks** объявила о версии 2 программного обеспечения для *OneTouch AT Network Assistant*, которая открывает новые возможности, облегчая работу сетевого техника по поиску ключевых проблем в проводных и беспроводных сетях конечных пользователей, исправлению или эскалации таких проблем, проверке характеристик и совместимости с SLA (соглашение об уровне обслуживания) после внесенных изменений.

Согласно недавнему опросу клиентов, проведенному Fluke Networks, сетевые техники тратят от 48 до 58 процентов больше времени на проблемы с беспроводными локальными сетями и приносимыми собственными устройствами (BYOD), и более чем 37 процентов тратят больше времени на VoIP (передача голоса по протоколу IP), чем два года назад.

При обновлении, к OneTouch AT были добавлены новые ключевые

функции, помогающие справиться с этими новыми задачами.

Новые возможности обнаружения Wi-Fi (включая устройства 802.11ac) и захват пакетов облегчают управление смарт-устройствами и ускоряют разрешение проблем.

Новые тесты производительности проводных и беспроводных сетей автоматизируют измерения и оценку производительности маршрута, обозначенного только конечными точками, что позволяет удостовериться в том, что проект завершен успешно, и производительность отвечает проектным требованиям.

Новый внутренний тест обеспечивает просмотр инициации IP-телефонов и процессов управления звонками, контроль качества разговоров VoIP, чтобы упростить устранение неполадок IP-телефонов.



«Сегодня занимающиеся сетевой поддержкой организации вынуждены ускорять процессы устранения неполадок и приемки проектов, а для этого требуется стандартизировать процессы и инструменты» — заявляет Эрик Андерсон (Eric Anderson), управляющий выпуск новой продукции Fluke Networks. «OneTouch AT от Fluke Networks дает уникальную возможность обеспечить команду портативным инструментом, который не только ускоряет обнаружение и устранение сетевых проблем для решения новых задач, но и предоставляет средства проверки производительности и приемки сети».

Обновление программного обеспечения OneTouch AT также включает новый тест анализа путей, тест многопортовой статистики, внутренний захват пакетов VoIP, и дополнительные возможности, способствующие устранению неполадок и управлению.

[www.flukenetworks.com](http://www.flukenetworks.com)