Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«Уфимский государственный нефтяной
технический университет»**

В.М. Лобанков

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

Уфа
Издательство УГНТУ
2020

УДК 389:550.832
ББК 30.10:26
Л 68

Рецензенты:
Зав. кафедрой геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений УГНТУ, д-р техн. наук, проф. Ю.А. Котенев.

Вед. науч. сотр. ООО Центр Метрологических исследований «Урал-Гео», канд. техн. наук В.Д. Святохин.

Лобанков, В.М. Основы метрологии геофизических измерений: учеб. пособие/ В.М. Лобанков. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020.–198 с.

ISBN 978-5-7831-1753-4

Изложены основы метрологии геофизических измерений параметров пластов и скважин. На основе анализа измерительного процесса геофизических исследований рассмотрены измеряемые параметры модели объекта измерений, адекватность модели объекту измерений, неопределенность и погрешность измерений, поправки, суммирование погрешностей и формы представления результата измерений. Приведен комплекс нормируемых метрологических характеристик геофизических средств измерений.

Даны основы метрологической деятельности по обеспечению единства геофизических измерений через воспроизведение и передачу единиц физических величин СИ. Приведено описание методик построения типовых калибровочных функций и методик поверки с показателями качества и достоверности.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальностям "Геофизика", "Геофизические методы исследования скважин" и "Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых". Пособие рекомендовано также студентам других специальностей, работникам метрологической, геологической и интерпретационной службы геофизических предприятий, разработчикам измерительной техники и аспирантам, связанным со скважинными измерениями.

УДК 389:550.832
ББК 30.10:26

ISBN 978-5-7831-1753-4

© ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», 2018
© Лобанков В.М., 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список обозначений 7

Введение 8

Глава I. ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН 11

1 Геофизические измерения и наука об измерениях 11

1.1 Метрология 11

1.2 Физические величины и их единицы 12

1.3 Измерения геофизических величин 14

1.4 Постулаты и аксиомы метрологии 16

1.5 Основное "уравнение" измерений и результат геофизических измерений 19

1.6 Идеальный и реальный измерительные процессы 24

1.7 Шкалы геофизических величин на диаграммах 32

2 Неопределенность и погрешность геофизических измерений 34

2.1 Систематические и случайные эффекты 34

2.2 Неопределенность как общее свойство измерений 35

2.3 Дефинициальная неопределенность 36

2.4 Погрешность как показатель неопределенности 36

2.5 Систематическая погрешность и ее модели 38

2.6 Случайная погрешность и ее модели 42

2.7 Нормированная допускаемая погрешность 48

2.8 Суммарная погрешность и достоверность измерений 51

2.9 Представление погрешности в результате измерений. Правила округления 58

3 Классификация погрешностей измерений 60

3.1 Систематические и случайные погрешности 60

3.2 Методические, инструментальные и субъективные 60

3.3 Оцененные и нормированные погрешности в статическом и динамическом режиме в абсолютной и от- 62

носительной форме
4 Поправки к показаниям и их погрешности 64
4.1 Истинное значение поправки и ее модели 64
4.2 Оценка поправки в нормальных условиях 68
4.3 Оценка поправки в рабочих условиях 68
4.4 Погрешность оцененной поправки 69
5 Геофизические средства измерений 70
5.1 Общая классификация средств измерений 71
5.2 Классификация геофизических СИ 73
5.3 Калибровка геофизических СИ и контроль их стабильности во времени 74
5.4 Нормируемые метрологические характеристики геофизических средств измерений 77
6 Методики выполнения геофизических измерений 85
6.1 Классификация скважинных измерений 85
6.2 Методика измерений как нормативный документ 88
6.3 Назначение методики измерений 89
6.4 Основные этапы разработки 90
6.5 Требования к изложению методики измерений 91
6.6 Референтная методика измерений 93
6.7 Правильность и прецизионность измерений 93
6.8 Обобщенная схема выполнения прямых измерений 96
7 Измерения в неоднородных средах 99
7.1 Химические элементы, вещества и горные породы 99
7.2 Микро- и макронеоднородность вещества 103
7.3 Типовые структуры при выполнении скважинных измерений 106
7.4 Зонд в неоднородной среде 110
7.5 Кажущееся значение измеряемой величины 111
7.6 Распознавание структуры неоднородной среды 112
7.7 Методики скважинных измерений 114

7.8 Интерпретация результатов скважинных измерений 117
7.9 Принципы выделения однородных структурных зон в пласте и скважине 120
7.10 Методические погрешности МСИ 121
7.11 Инструментальные погрешности скважинных измерений 126
7.12 Скважинные измерения концентрации веществ 131
Вопросы для самопроверки по первой главе 135
Глава II. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ 136
8 Метрологическое обслуживание и прослеживаемость 136
8.1 Метрологическая служба геофизической компании 136
8.2 Эталоны единиц геофизических величин 138
8.3 Прослеживаемость единиц и ее подтверждение 143
8.4 Передача единиц величин геофизическим приборам 145
9 Калибровка геофизических средств измерений 147
9.1 Шкалы и калибровочные функции (КФ) 147
9.2 Способы построения линейной КФ вида Y=a+b·X 149
9.3 Способы построения параболической КФ вида Y=a+b·X +c·X^2 153
9.4 Способы построения логарифмической КФ вида Y=a+b·ln(X) 157
9.5 Способ построения линейной КФ в виде функции двух переменных $Y=a+bT+(c+dT)X$ 159
9.6 Способ построения линейной КПФ в виде функции трех переменных $Y=a+bX+cU+dZ+fXU+pXZ+qUZ+sXUZ$ 160
10 Экспериментальная оценка метрологических характеристик геофизических средств измерений 164
10.1 Аддитивная и мультипликативная поправки 164

10.2 Среднее квадратическое отклонение 166
10.3 Вариация (гистерезис) показаний 166
10.4 Изменение показаний СИ за нормированное время его непрерывной работы 167
10.5 Поправочная функция влияния изменения температуры на показания скважинной аппаратуры 168
11 Поверка геофизических средств измерений 169
11.1 Подтверждение соответствия 169
11.2 Основные операции поверки 171
11.3 Документирование соответствия 173
11.4 Показатели качества и достоверности поверки 173
Вопросы для самопроверки по второй главе 177
Заключение 178
Список литературы 180
Приложение – Краткий терминологический справочник 183
Об авторе 198

Список обозначений и сокращений

$B_{ист}$ – истинное значение измеряемой величины (измеряемая величина);
$B_э$ – эталонное значение измеряемой величины;
$B_{изм}$ – показание СИ (измеренное значение величины);
$B_{изм.н}$ – показание СИ в нормальных условиях;
$B_{изм.р}$ – показание СИ в рабочих условиях;
Y – измеряемая величина (при построении КФ);
X или x – выходной сигнал СИ (при построении КФ);
$\theta_{ист}$ – истинное значение поправки к показанию прибора;
$\theta_н$ – поправка к показанию прибора в нормальных условиях измерений;
$\theta_р$ – поправка к показанию прибора в рабочих условиях измерений;
Δ – абсолютная погрешность измерений или поправки;
δ – относительная погрешность измерений;
σ – среднее квадратическое отклонение;
u – стандартная неопределенность (*uncertainty*);
u_c – суммарная стандартная неопределенность;
U – расширенная стандартная неопределенность;
k_P – коэффициент охвата для расширенной суммарной неопределенности при вероятности P;
k_P – коэффициент, используемый при оценке суммарной систематической погрешности доверительным интервалом при вероятности P;
S – выборочное стандартное отклонение;
SI – международная система единиц;
ГИС – геофизические исследования (измерения) в скважинах;
ГХ – градуировочная характеристика;
ИС – измерительная система;
КФ, ПФ– калибровочная функция, поправочная функция;
КПФ - калибровочно-поправочная функция;
МИ (МВИ) – методика измерений (методика выполнения измерений);
МСИ – методика скважинных измерений;
НМХ – нормируемые метрологические характеристики СИ;
РСК – Российская система калибровки;
СИ – средство измерений;
СКО – среднее квадратическое (стандартное) отклонение;
СО – стандартный образец;
УЭС – удельное электрическое сопротивление.

Введение

Высказывание Д.И. Менделеева – "Наука начинается с тех пор, как начинают измерять" – отражает важность роли измерений в научно-техническом прогрессе современного общества.

Деятельность с использованием средств измерений (СИ) можно разделить на "***измерительную деятельность***", связанную непосредственно с рабочими СИ, хранящими единицу величины, и "***метрологическую деятельность***", связанную с эталонами, воспроизведением и передачей единиц СИ, а также с определением поправок к показаниям приборов, уже хранящих единицу.

Соответственно в метрологии - науке об измерениях раздельно рассматриваются *две обособленные части единой теории измерений*.

Первая часть - собственно ***теория измерений величин***, созданная в предположении, что СИ уже хранит единицу, переданную ранее от эталона с обоснованной погрешностью. Основное содержание здесь связано с научным обоснованием методики получения результата измерений - измеренного значения величины и погрешности.

Вторая часть - ***теория метрологического обслуживания*** измерений. Она посвящена вопросам создания эталонов единиц величин, обоснования погрешности их воспроизведения и передачи другим эталонам или рабочим СИ.

Метрология геофизических измерений развивается, её основные положения и научная терминология постоянно претерпевают изменения. За основу принята терминология, принятая в РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения [19].

Основы общей метрологии были заложены Д.И. Менделеевым и создавались учеными применительно к измерениям параметров объектов (однородных сред, предметов, процессов, явлений). Благодаря исследованиям профессора М.Ф. Маликова и профессора К.П. Широкова в середине XX века метрология стала признанной наукой. Постулировалось существование "*истинного значения величины*", определение которого невозможно вследствие неидеальности измерительного процесса. Неопределённость соотношения измеренного и истинного значений измеряемой величины изначально рассматривалось как общее свойство любого измерения. Международный комитет мер и весов (МКМВ) в 1979г. предложил вместе с понятием"*погрешность измерений*" использовать понятие "*неопределённость измерений*" (*uncertainty*) и в 1995 г. Международная организа-

ция по стандартизации (ISO) опубликовала "Руководство по выражению неопределённости измерений" [26, 32]. В России концепция погрешности считается основной, а концепция неопределенности рекомендована для использования при взаимодействии с иностранными компаниями.

Объекты геофизических исследований (пласты, рудные тела) относятся к неоднородным средам, для которых теория измерений находится в стадии формирования. Приходится одновременно измерять и измеряемые и влияющие величины, вводить поправки по каждой влияющей величине. В таких условиях погрешности измерений параметров пластов и скважин не равны погрешностям средств измерений. Погрешность скважинных средств измерений отражает лишь погрешность измерений кажущихся значений измеряемой величины. Общая погрешность скважинных измерений складывается из инструментальной погрешности измерений (погрешности скважинной аппаратуры), погрешности поправок, связанных с погрешностью измерений влияющих величин, и методических погрешностей, связанных с ограничениями применимости методики.

В основу данного пособия положены тексты лекций, прочитанных автором студентам геофизических и геологических специальностей УГНТУ и БашГУ, а также метрологам геофизических предприятий в Центре дополнительного профессионального образования "Урал-Гео" [14, 16]. Пособие разработано в дополнение к учебному пособию «Метрология, стандартизация, сертификация» [16].

В первой главе изложены основы понимания (представления в сознании) сути измерительного процесса, даны представления о неопределенности истинного значения измеряемой величины и математического ожидания показаний, о систематической и случайной погрешности измерений, о поправках к показаниям и форме представления результата геофизических измерений. Предложено постулировать существование математического ожидания показаний, которое также не может быть определено. Приведена общая схема методики выполнения прямых геофизических измерений. Дана классификация геофизических СИ, рассмотрены их нормируемые метрологические характеристики.

Вторая глава посвящена метрологическому обслуживанию геофизических измерений. Рассмотрены воспроизведение, передача и хранение единиц величин, включая калибровку и поверку СИ с уча-

стием эталонов, а также способы обеспечения требуемой точности измерений.

В приложении приведен краткий справочник основных метрологических терминов.

Автор надеется, что пособие окажется полезным для широкого круга инженеров-геофизиков и метрологов, будет способствовать совершенствованию геофизических измерений. Он также будет признателен читателям за высказанные замечания.

lobankov-vm@mail.ru; **gfugntu@mail.ru**

Глава I

ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1 Геофизические измерения и наука об измерениях

1.1 *Метрология*

Метрология – наука об измерениях, методах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности (определение из международного словаря VIM-3 [36]). Различают теоретическую, законодательную и прикладную метрологию.

Греческое слово "*метрология*" образовано от слов "*метрон*" - мера и "*логос*" - учение, дословно - "*учение о мерах*". *Предметом метрологии* является извлечение количественной информации о свойствах материальных объектов[1, 2, 9, 11].

Из определения понятия "*метрология*" следует, что она является научной основой двух видов человеческой деятельности – *измерительной*, выполняемой с использованием средств измерений с целью получения результата измерений величины, и *метрологической*, выполняемой с целью воспроизведения единицы величины и передачи ее средству измерений (СИ) на хранение для осуществления измерительной деятельности.

К метрологической деятельности относятся все процедуры, связанные с эталонами, включая: 1) ***научное обоснование, создание и применение*** эталонов; 2) ***передачу средствам измерений единицы величины*** от эталона (получение шкалы или калибровочной функции) или определение поправок к показаниям СИ и оценка их погрешности; 3) ***подтверждение соответствия*** СИ метрологическим требованиям.

При изложении основ теории измерений считается, что *единица величины уже передана СИ с погрешностью*, установленной в процессе метрологической деятельности. Будем отдельно рассматривать теорию обеспечения единства измерений и прослеживаемости применяемых единиц физических величин к первичным эталонам.

1.2 *Физические величины и их единицы*

Окружающий нас физический мир представляет собой совокупность конкретных предметов, процессов и явлений, каждый из которых в сознании человека может характеризоваться какой-либо **физической величиной** (или просто – величиной).

Величина – это **свойство материального объекта, физической системы, явления или процесса, общее в качественном отношении для многих объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них** [19, 36].

Например, предметы обладают общим свойством протяженности в пространстве, все они имеют конкретные размеры (длину, ширину, высоту). Это свойство характеризуется величиной, которую называют длиной. Данная величина позволяет отличать одни предметы от других по их размерам, ее единица – метр. Пласты горных пород имеют разное кратчайшее расстояние от кровли до подошвы, то есть разную толщину в метрах. Любые события характеризуются длительностью, мерой которой является время, её единица – секунда. Предметы обладают инертностью, характеризующейся массой, её единица – килограмм.

По видам явлений величины делятся на вещественные (*пассивные*), энергетические (*активные*) и величины, характеризующие *процессы*.

Выделяют пространственно-временные, механические, тепловые, электрические и магнитные, акустические, световые и физико-химические величины, а также величины ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

Величины бывают *основными и производными, размерными и безразмерными*.

Размерность – характеристика величины, выраженная в форме степенного многочлена, отражающая ее связь с основными величинами. Размерность используется для перевода единиц из одной системы в другую.

Система физических величин – совокупность величин, образованная с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются их функциями. Например, система LMT – длина (L), масса (M), время (T).

Качество продукции, товаров и услуг характеризуется ***показателями качества,*** общими для них в качественном отношении, но индивидуальные количественно. К ним относятся показатели назначения, надежности, безопасности, транспортабельности, технологичности, а также эстетические, эргономические и экологические показатели [30].

Размер величины – количественная определенность величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Значение величины – выражение размера величины в виде некоторого числа принятых для него единиц. Число, входящее в значение величины, называется "*числовым значением величины*" или "*измеренным значением величины*" или просто "*измеренным значением*".

Не следует применять слово "*величина*" в смысле "числовое значение величины". Например, словосочетание "*величина массы прибора*" или "*величина удельного электрического сопротивления пласта*" употреблять не рекомендуется, так как "*масса*" – уже название величины. Иначе – "масло масляное". Поэтому следует говорить и писать, например "*измеренное значение массы*" или "*измеренное значение удельного электрического сопротивления*".

Единицей величины называется ***величина [В], которой присвоено числовое значение, равное 1, принятое по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин*** [36].

Это значение с минимальными показателями неопределенности воспроизводится первичным эталоном. По мере передачи единицы данной величины СИ происходит возрастание степени неопределенности измерений (накопление погрешностей).

Система единиц физических величин – совокупность единиц основных и производных величин в соответствии с определенными принципами. В России принята ***международная система*** единиц физических величин SI (International System of Units), которая включает 7 основных единиц величин. Остальные единицы являются производными от основных единиц величин (ГОСТ 8.417-2002). Допускается "*единицу величины*" называть "*единицей измерения*". Единицы бывают системными и внесистемными, кратными и дольными [2, 11].

Единица величины обычно воспроизводится и передаётся от эталона рабочему средству измерений в нормальных условиях с оцененной погрешностью при заданной вероятности.

1.3 *Измерения геофизических величин*

Человек, как неотъемлемая часть природы, познает окружающий его физический мир преимущественно путем измерений физических величин. Достоверная исходная информация, полученная путем измерений величин, параметров и показателей, является основой любой формы управления, анализа, прогнозирования, планирования, контроля и регулирования. При изучении природных ресурсов, при контроле их рационального использования, при охране окружающей среды и обеспечении экологической безопасности она особо важна.

Измерения играют огромную роль в современном обществе, на них в развитых странах затрачивается до 10 % общественного труда.

Измерение – ***процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине***" [19, 36].

Измерением также называют "*совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины*". Данное определение сформулировано в Федеральном законе "Об обеспечении единства измерений" (№ 102-ФЗ от 26 июня 2008 г.). К сожалению, оно предоставляет свободу в толковании словосочетания "*количественное значение величины*". Ранее измерением называли "*процесс сравнения величины с ее значением, принятым за единицу*" [2].Это определение, на наш взгляд, наиболее адекватно отражает суть измерительного процесса.

Измерение предусматривает описание величины в соответствии с предполагаемым использованием результата измерения, методику измерений и средство измерений, функционирующее в соответствии с регламентированной методикой измерений, а также с учетом условий измерений.

Измерение осуществляется на основе какого-либо *явления материального мира*, называемого ***принципом измерений***. Например, использование гравитационного притяжения при измерении массы предметов, веществ и материалов взвешиванием.

Для реализации принципа измерений используется ***метод измерений*** – "*прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей или соотнесения со шкалой*". Различают методы непосредственной оценки и методы сравнения. Методы сравнения, в

свою очередь, делятся на дифференциальный (нулевой) метод, метод замещения и метод совпадения [1, 2, 11, 19].

Объект измерения – *материальный объект, который характеризуется одной или несколькими измеряемыми величинами*.

Измеряемая величина (измеряемый параметр) – *величина, подлежащая измерению*, – это параметр (или функционал параметров) модели объекта измерений, выраженный в единицах величины или в относительных единицах и принятый субъектом в качестве измеряемого параметра по определению. Например, "длина стального стержня – кратчайшее расстояние между его плоскопараллельными торцевыми поверхностями при температуре (20±1) ^{o}C".

Таким образом, следует четко различать понятия "*величина*" и "*измеряемая величина*", которые по смыслу и определению существенно отличаются. Понятие "*величина*" относится к философской категории "***общее***" и формулируется для совокупности объектов как бы вообще для любых измерений величины. Понятие" *измеряемая величина*" относится к категории "***частное***" и формулируется применительно к выбранной модели одного конкретного объекта или совокупности однотипных объектов для фиксированных условий измерений.

Геофизика – наука, изучающая вещество, физические поля, явления и процессы, которые протекают в оболочках Земли и в ее ядре. Геофизические величины отражают свойства твердого, жидкого и газообразного вещества Земли, а также ее физических полей.

Геофизическая величина – это физическое свойство какого-либо объекта Земли (вещества или физических полей *атмосферы, гидросферы, пластов земной коры, мантии, ядра*), **общее** в качественном отношении для многих объектов, но в количественном отношении **индивидуальное** для каждого из них [19, 36].

По месту проведения методы геофизических исследований подразделяют на следующие:

- аэрокосмические (дистанционные, атмосферные);
- полевые (наземные, поверхностные);
- акваториальные (океанические, морские, речные);
- геофизические исследования в шахтах (шахтно-рудничные);
- геофизические исследования в скважинах (промысловая геофизика, каротаж, ГИС).

При выполнении полевых работ на земной поверхности измеряют параметры возбужденных сейсмических волн, электрические и магнитные параметры пластов и рудных тел, а также аномалии гравитационного поля в земной коре.

При выполнении геофизических исследований в скважинах (ГИС) измеряют следующие основные параметры пласта: коэффициенты пористости, глинистости, проницаемости, нефтенасыщенности (газонасыщенности, водонасыщенности); плотность; скорость и коэффициент затухания ультразвука; мощность дозы гамма-излучения; концентрация урана, тория и калия;

Объектом ГИС является также скважина, где измеряемыми параметрами являются следующие: диаметр скважины; толщина и плотность глинистой корки; плотность цемента; толщина стенки колонны. Измеряемыми параметрами вещества внутри колонны являются следующие: температура; давление; расход воды (нефти, газа); влагосодержание нефти; плотность и удельная электрическая проводимость флюида.

Измерения выполняют в нормальных и рабочих условиях (рисунок 1).

Рисунок 1 – Условия применения средства измерений

В рабочих условиях параметры средства измерений изменяются, соответственно, изменяется его шкала. Поэтому для восстановления шкалы, построенной в нормальных условий вводят поправки в показания, зарегистрированные в рабочих условиях.

1.4 *Постулаты и аксиомы метрологии*

В реальном измерительном процессе в силу воздействия случайных факторов всегда наблюдается рассеяние случайных показаний одного или разных приборов или рассеяние случайных измеренных значений, полученных в результате реализации одной методики

или нескольких методик измерений (МИ) одной и той же измеряемой величины. Целью любых измерений является поиск ***истинного значения*** измеряемой величины – такого значения, которое соответствует определению измеряемой величины (true value) [19]. Из сформулированного определения должно быть ясно, при каких условиях величина принимает единственное неизменное значение, которое соответствует цели измерений.

Следует признать, что ***измеренное значение (или показание прибора) всегда является реализацией случайной величины***, которая связана с ее истинным значением только *вероятностной зависимостью*, и это аксиома.

Измеренное значение – всегда случайная величина

Поэтому ***многократные измерения можно считать серией однократных измерений***, в каждом из которых фиксируется одно показание прибора (или одно измеренное значение). Однократные измерения планируют при несущественном разбросе показаний.

При построении теории измерений следует учитывать два *общих свойства* измерений: 1) неопределенность истинного значения измеряемой величины (true value) [11]; 2) неопределенность математического ожидания измеренных значений (expected value) [13].

Исходя из этих двух свойств измерений, в основу *метрологии* положены два *постулата* (рисунок 2).

Постулаты теории измерений

Постулат № 1
Истинное значение измеряемой величины существует, оно постоянно и не может быть определено

Постулат № 2
Математическое ожидание случайных измеренных значений величины существует, оно постоянно и не может быть определено

Рисунок 2 – Постулаты теории измерений

Из этих постулатов следует, что случайность измеренного значения порождает ***неопределенность*** отклонения любого среднего измеренного значения величины как от ее истинного значения, так и от математического ожидания измеренных значений.

Выделяют еще *две аксиомы* метрологии [30]:

- без средства измерений, хранящего единицу величины, измерение невозможно;

- без априорной информации (об объекте, эталонах, средствах и условиях измерений) выполнение измерений невозможно.

Как следствие, из этих постулатов можно выделить два утверждения:

Следствие № 1 - "существует истинное значение отклонения измеренного значения величины от её истинного значения (истинное значение поправки) и его определить невозможно".

Следствие № 2 - "передача единицы величины средству измерений без погрешности невозможна".

В международных документах по метрологии слово "*истинное*" иногда опускается и используется просто термин "*значение величины*" [26, 30]. Считается, что понятия "*истинное значение измеряемой величины*" и "*измеряемая величина*" эквивалентны.

Учитывая неидеальность эталонов, рабочих СИ и измерительного процесса в целом, выражение для истинного значения измеряемой величины $B_{ист}$ в фиксированный момент времени теоретически можно представить в виде уравнения

$$B_{ист} = B_{изм} + \theta_{ист} \ , \qquad (1)$$

где $B_{изм}$ – показание СИ (измеренное значение величины);

$\theta_{ист}$ – истинное значение поправки к показанию прибора в рабочих условиях измерений.

Поскольку истинное значение величины никогда неизвестно, то и истинное значение поправки не может быть определено (см. выше следствие № 2). Значит, выражение

$$\theta_{ист} = B_{ист} - B_{изм} \qquad (2)$$

может иметь практическую ценность только при математическом моделировании измерительного процесса, когда истинное значение величины может быть задано с погрешностью, определяемой только возможностями (разрядностью) вычислительной техники.

Истинное значение поправки нельзя называть "погрешностью с обратным знаком", так как оно никак не может быть использовано для описания измерительного процесса.

На практике часто возникает необходимость максимально повысить показатели точности измерений, то есть приблизить измеренное значение к истинному значению. Для этого производят коррекцию показания СИ, хранящего единицу, путем введения аддитивных или мультипликативных поправок, определяемых:

1) в нормальных условиях для уточнения единицы величины, ранее переданной СИ, с использованием эталона;

2) в рабочих условиях для учета изменения показаний СИ относительно показаний этого же СИ в нормальных условиях.

На измерения затрачивается некоторое время, в течение которого могут изменяться как сама измеряемая величина, так и средство измерений. За это время фиксируют множество случайных показаний и за измеренное значение принимают среднее.

Измеряется реальная величина, а измеренное значение приписывается параметру модели объекта

Сначала выбирается величина для описания свойства объекта и эталон единицы этой величины. Затем формулируется определение измеряемого параметра модели этого объекта и строится методика его измерений на основе единичного показания или среднего по множеству показаний средства измерений и погрешности.

Эталон единицы величины непосредственно в процессе измерений не участвует. Считается, что СИ, используемое в процессе измерений, уже хранит заранее переданную от эталона единицу величины.

1.5 *Основное "уравнение" измерения и результат геофизического измерения*

Наука метрология в части отражения измерительной деятельности дает обоснование представлению результата измерений в условиях неопределенности. Единица величины не может быть передана СИ без указания показателей точности(систематической и случайной погрешности). При изложении основ теории измерений, опираясь на указанные выше постулаты, следует в единстве рассматривать четыре взаимосвязанных понятия: "*единица величины*"; "*истинное значение*

величины"; "*измеренное значение величины*"; "*погрешность измерений*" (в вероятностном смысле).

Целью измерений какого-либо параметра, отражающего свойства реального объекта, считается "***определение истинного значения измеряемой величины***" [1, 2, 9, 11, 27]. Однако это идеализированная недостижимая цель. В соответствии с постулатами метрологии более реальной целью измерений следовало бы сразу считать поиск оптимального ***интервала для истинного значения измеряемой величины*** с указанием вероятности.

В любом случае цель измерений достигается только тем, что результат измерений представляют не в виде одного числа - измеренного значения, а в виде интервала (совокупности чисел) на числовой оси. Это утверждается в обеих концепциях измерений.

При этом предполагается, что истинное значение измеряемой величины может оказаться в этом интервале с вероятностью не менее заданной. Важно только верно определить и указать этот интервал. Причем ширина интервала показывает границы (степень) неопределенности отклонения измеренного значения величины от её истинного значения и на практике часто называется просто "*погрешностью измерений*". В концепции неопределенности этот интервал назван "*неопределенностью измерений*", а в концепции погрешности – "*интервальной оценкой погрешности измерений*".

Следует заметить, что точечная оценка случайной величины в виде стандартного отклонения тоже становится интервалом, если перед ним поставить символ "±".

Исходя из рассмотренных выше постулатов и единства четырех взаимосвязанных основных понятий метрологии, а также с учетом принятого определения понятия "*измерение*", ***основное "уравнение" измерений*** можно записать в следующем виде:

$$B = (B_{\text{изм}} \pm \Delta_{\text{р}}) \cdot [B], \qquad (3)$$

где B – измеряемая величина (истинное значение); $[B]$ – единица этой величины; $B_{изм}$ – измеренное значение величины (число единиц $[B]$); $\pm\Delta_{\text{Р}}$ – абсолютная погрешность измерений в единицах $[B]$ при доверительной вероятности P.

Эта формула символически объясняет суть измерительной деятельности и показывает неразрывность всех указанных в ней состав-

ляющих. Нельзя отбросить "*единицу*" [*B*], иначе измерение принципиально невозможно и "*измеренное значение*" $B_{изм}$ бессмысленно. Нельзя отбросить "*погрешность*", иначе "*истинное*" становится равным "*измеренному*" $B = B_{изм} \cdot [B]$, что также невозможно.

Итог измерений – интервал для величины *B* в единицах [*B*]. Измерения завершаются утверждением, что измеряемая величина *B* может оказаться в интервале значений от $B_{изм} - \Delta_р$ до $B_{изм} + \Delta_р$ с вероятностью не менее P.

Знак "=" здесь имеет <u>символическое значение</u> и означает, что измеряемой величине может быть приписано любое значение только в указанном интервале, если $P = 1$, и не только в указанном интервале, но и за его пределами, если $P < 1$. Отсюда слово "*уравнение*" в названии раздела 1.5 записано в кавычках.

При наличии поправок измеренное значение величины в общем случае определяют по формуле

$$B_{изм.ср} = B_{изм.ср} + \theta_н + \sum \theta_{рi} \qquad (4)$$

где $B_{изм.ср}$ – среднее измеренное значение величины; $\theta_н$ – поправка в нормальных условиях; $\theta_{рi}$ – сумма всех поправок в рабочих условиях от каждой *i*-й влияющей величины.

Измеряемая величина неизменна, но числовое значение $B_{изм}$ будет разным для разных выбранных единиц величины ([*B*]), а числовое значение погрешности $\pm\Delta_Р$ зависит как от единицы [*B*], так и от доверительной вероятности *P*. Символ "±" не относится к знакам арифметических действий. Он лишь показывает (символизирует), что погрешность – это интервал и его границы приняты симметричными относительно измеренного значения величины $B_{изм}$.

<u>Числовое значение без "±" не считается погрешностью [13]</u>.

В исключительно редких случаях возможно представление результата измерений несимметричным интервалом.

Обоснование ширины интервала $\pm\Delta_Р$ для представления результата измерений является сложной математической задачей. Границы этого интервала зависят от вероятности P и не могут быть абсолютно точными, так как <u>систематические составляющие погрешности измерений присутствуют всегда, а количество измеренных значений всегда ограничено</u>.

В общем случае суммарная погрешность представляет собой функцию от погрешности поправки в нормальных ($\pm\Delta_{Рθн}$), погрешно-

сти суммы поправок в рабочих ($\pm\Delta_{P\theta р}$) условиях и случайной погрешности $\pm\Delta_{Pсл}$ в зависимости от количества измеренных значений *n* и вероятности *P*:

$$\Delta_P = f(\pm\Delta_{P\theta н}; \pm\Delta_{P\theta р}; \pm\Delta_{Pсл}; n). \qquad (5)$$

Часто пользуются принципом "***оценки сверху***": ***границы интервала устанавливают чуть шире или вероятность чуть ниже в надежде на то, что методические погрешности измерений малы, истинное значение измеряемой величины все же окажется в выбранном интервале и это событие на самом деле может произойти с более высокой вероятностью, чем указана в результате измерений***.

Доказательство обоснованности выбранного интервала для истинного значения величины непосредственно связано с *метрологической деятельностью*, целью которой является воспроизведение и *передача* средствам измерений "единых" *единиц* величин или определение (измерение) *поправок* к показаниям СИ, уже хранящих ранее переданную единицу.

Выражение (3) нами названо *основным "уравнением" измерения* ещё и потому, что оно одновременно показывает ***основную форму представления результата любого измерения*** в виде интервала $B_{изм} \pm \Delta_р$ для истинного значения измеряемой величины как факт достижения цели измерений [15].

В измерительной практике долгое время под "*результатом измерений*" подразумевали только "измеренное значение величины" – "искомое значение величины, полученное путем сопоставления измеряемой величины с её единицей" [2].

В отмененном стандарте ГОСТ 16263-70 "ГСИ. Метрология. Термины и определения" и в словаре-справочнике [17] было определено: "Результат измерений - значение величины, полученное путем ее измерения". Поэтому измеренное значение величины указывали с округлением до "разумного" количества значащих цифр (часто и без округления) и через пробел добавляли буквенное обозначение единицы этой величины.

Очевидно, что в таком случае представлялась только часть информации об измерении и умалчивались сведения о погрешности. В монографии [10] , например, сказано: "*если результат измерений*

объявляется без указания его погрешности, то этим не сообщается никакой информации и такие сведения не имеют смысла".

По определению [19] "***результат измерения – множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией***".

Это определение также свидетельствует о том, что ***результат*** измерений - это ***всегда интервал***. Очевидно, что разброс показаний – это реальный наблюдаемый интервал, который расширяется по мере увеличения числа показаний. К нему необходимо добавить еще вероятностный (ненаблюдаемый) интервал от неизвестного отклонения измеренного среднего значения величины от истинного значения измеряемой величины. Его можно было бы наблюдать при измерении неизменной величины разными приборами.

Косвенное указание на необходимость представления результата измерений с указанием погрешности имеется и в Законе № 102-ФЗ в определении понятия "*методика (метод) измерений*".

Например, длина предмета как расстояние между торцами идеально гладких плоскопараллельных поверхностей, измеренная штангенциркулем, может оказаться в интервале (196,7±0,1) мм с вероятностью 1. Такая форма представления результата измерений параметра объекта (вернее параметра модели объекта) логична и наиболее полно отражает суть измерительного процесса. Здесь 196,7 мм – измеренное значение длины предмета, ±0,1 мм – абсолютная погрешность при доверительной вероятности 1 как показатель неопределенности выполненных измерений. Результат измерений – это интервал от 196,6 до 196,8 мм для измеряемой длины. Цель измерений достигнута.

При измерениях бытовой рулеткой качество измерений длины того же самого предмета было бы на порядок хуже, а результат измерений был бы представлен как интервал (197±1) мм. Доверительная вероятность "по умолчанию" равна 1. Из данного примера видно всё преимущество представления "результата измерений" не в виде одного числа – измеренного значения, а интервалом на числовой оси. Очевидно, что качество первого результата измерений штангенциркулем выше качества второго результата измерений рулеткой.

На гирях следовало бы наносить маркировку с указанием помимо номинального воспроизводимого значения массы ещё и допускаемую абсолютную погрешность, например "500,0±0,1 г" или "1000±1 г".

Обычно для представления результата измерений в качестве измеренного значения используют среднее значение, которое в зависимости от способа осреднения часто представляют *средним арифметическим* значением величины и реже *медианой* (статистическим средним).

Процесс получения результата измерений показан на рисунке 3.

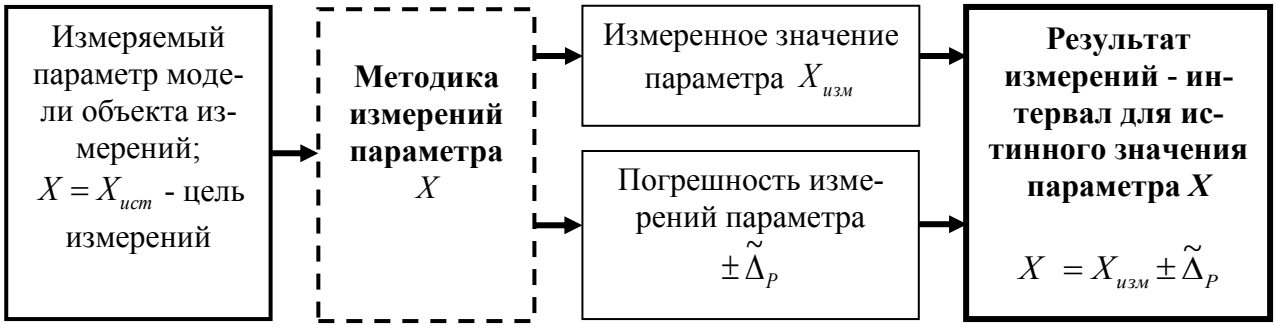


Рисунок 3 – Схема процесса получения результата измерений

При выполнении измерений оператор первоначально стремится найти абстрактное числовое значение величины $B_{изм}$ – число единиц величины [B].

Затем он находит обоснованную погрешность выполненных измерений $\pm\Delta_P$ в окрестности этого числа в тех же единицах [B] для выбранной вероятности P, чтобы выразить и показать интервал для возможных значений измеряемой величины. В итоге, полный результат измерений должен содержать три числа: 1) $B_{изм}$; 2) $\pm\Delta_P$; 3) P.

1.6 *Идеальный и реальный измерительные процессы*

Измерительный процесс – это совокупность сложных процедур, связанных со сбором информации об объекте, с условиями их выполнения, с построением математической модели и анализом ее измеряемых параметров. Предусматривается также анализ адекватности выбранной (принятой) модели объекта реальному объекту измерений, построение модели поправки и погрешности, статистическая обработка измеренных значений и оформление результата измерений.

Идеальным следовало бы считать измерительный процесс неизменной величины, когда соблюдаются два условия:

1) имеется возможность считывать бесконечное количество показаний средства измерений в измерительном процессе с изменяющимися условиями и находить их математическое ожидание;

2) имеется возможность определить истинное значение поправки к математическому ожиданию показаний.

При этом совокупность выполняемых операций в условиях систематических эффектов и случайного разброса показаний в конечном итоге приводила бы к получению истинного значения.

На рисунке 4 показано графическое отображение на числовой оси элементов идеального измерительного процесса.

Рисунок 4 – Графическое отображение на числовой оси элементов идеального измерительного процесса

Если бы удавалось узнать истинное значение поправки, то после её введения математическое ожидание совпало бы с истинным значением измеряемой величины. Если измеряемая величина изменяется случайным образом, то за истинное значение следовало бы принять ее математическое ожидание.

Однако, исходя из постулатов метрологии, определить истинное значение поправки невозможно, как и получить бесконечное число измеренных значений также невозможно.

Физическая реальность отображается в сознании человека. Реальное СИ, хранящее единицу величины, человек приводит во взаимодействие с реальным объектом познания (объектом измерений). Он планирует измерения, создавая модель объекта, модель погрешности измерений, продумывает все измерительные процедуры в своём сознании.

Только в сознании субъект обосновывает и формирует ответы на следующие вопросы: **зачем, что, чем и как измерять?**

Для обеспечения принципиальной возможности выполнения измерений предварительно создается эталон единицы физической величины, отражающей конкретное свойство совокупности объектов физической реальности, в том числе и свойство конкретного объекта измерений. Единица величины воспроизводится первичным эталоном с минимальной погрешностью.

Эта единица до выполнения измерений передается конкретному СИ, планируемому для изучения объекта (для решения измерительной задачи). При передаче единицы от эталона к другим СИ погрешности измерений накапливаются, и интервал для возможных значений измеряемой величины расширяется.

Ключевым моментом реального измерительного процесса является этап описания изучаемого объекта физической реальности (формирование модели объекта) и выбора (формулирование определения) измеряемого параметра этой модели. От этого выбора зависит модель погрешности измерений и в конечном итоге – результат измерений. Результаты измерений могут быть разными в зависимости от выбранного параметра модели объекта измерений.

Измеряемая величина может быть случайной величиной или закономерно изменяться, то есть истинных значений может быть несколько и это должно быть учтено в описании (определении) измеряемой величины.

Схема, поясняющая сущность измерительного процесса, представлена на рисунке 5.

Жирная вертикальная пунктирная линия, делящая рисунок на две части, показывает условную границу между физической реальностью и сознанием применительно к измерениям величин.

Измерительный процесс рассматривают как меняющийся во времени случайный процесс, в котором при многократных измерениях получают разные измеренные значения. За время многократных измерений возможно изменение как самой измеряемой величины, так и факторов, влияющих на средство и методику измерений. Поэтому возникает необходимость математической обработки совокупности измеренных значений и введения предусмотренных поправок для получения одного наиболее вероятного измеренного значения величины.

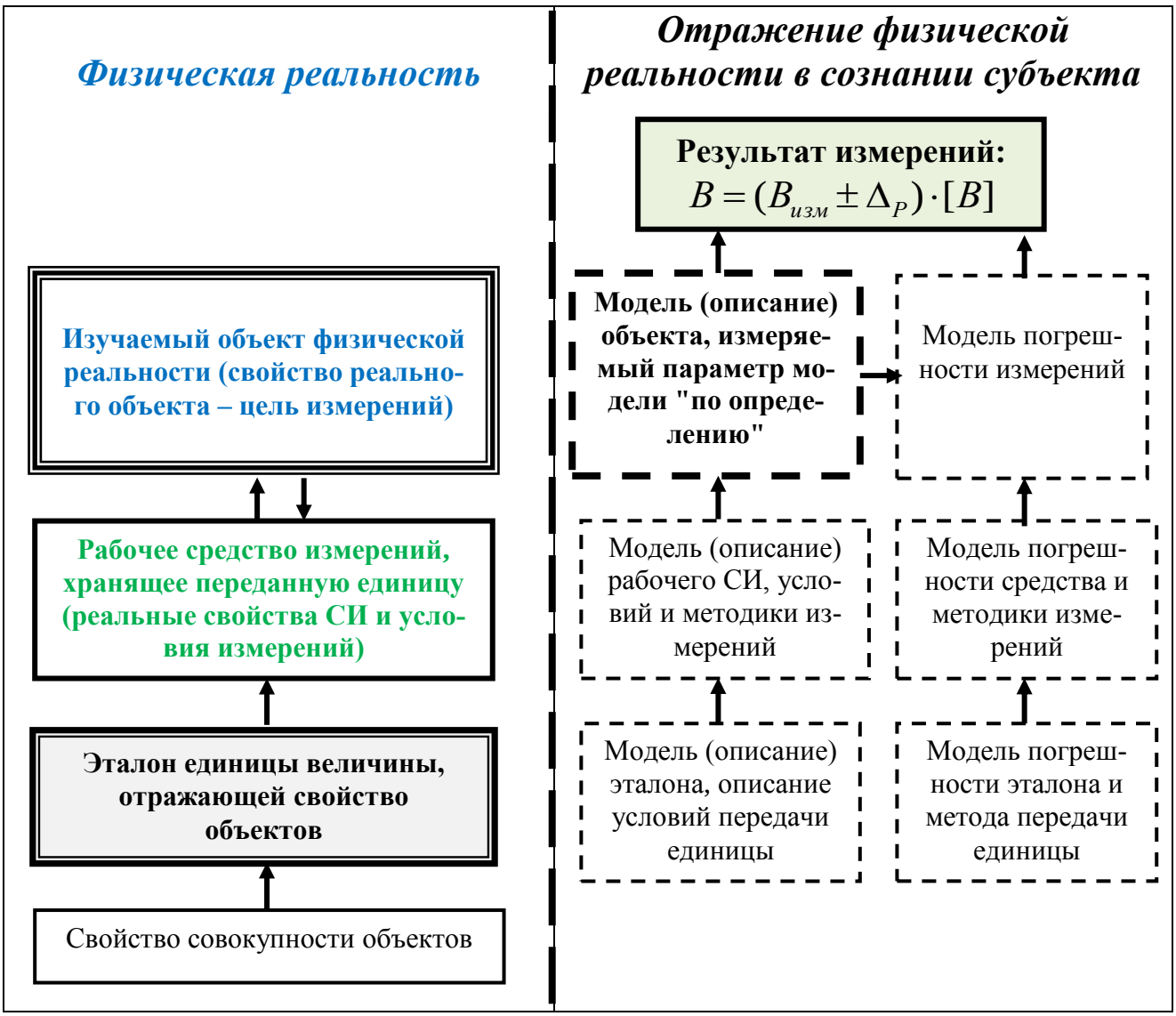


Рисунок 5 – Схема взаимосвязи элементов измерительного процесса в физической реальности и в сознании субъекта

Самое трудное в измерительном процессе – это обоснование показателей неопределенности выполненных измерений (систематических и случайных погрешностей) и объективное представление результата измерений в виде интервала на числовой оси. Необходимо ввести известные поправки, выявить все возможные источники погрешности, отбросить незначительные из них и правильно представить оставшиеся существенные погрешности в результате измерений.

В реальном измерительном процессе следует учитывать три аспекта:

1) измеряемая величина может менять свои истинные значения во времени под воздействием влияющих факторов; эти изменения от-

слеживает средство измерений, и они вместе с собственной нестабильностью средства измерений входят в разброс показаний;

2) количество показаний всегда конечно, нет возможности найти их математическое ожидание, случайная погрешность присутствует всегда;

3) поправки к показаниям не могут иметь истинных значений, систематическая погрешность в измерениях присутствует всегда.

Таким образом, за время измерений в условиях воздействия случайных факторов меняется как измеряемая величина, так и характеристики средства измерений. Если измерительный процесс продолжается, то в разные отрезки времени средние значения поправки будут разными.

Пример графического отображения на числовой оси реального процесса измерений величины средством измерений, хранящим ранее переданную единицу, с использованием поправки к его показаниям, определенной при его калибровке, приведен на рисунке 6.

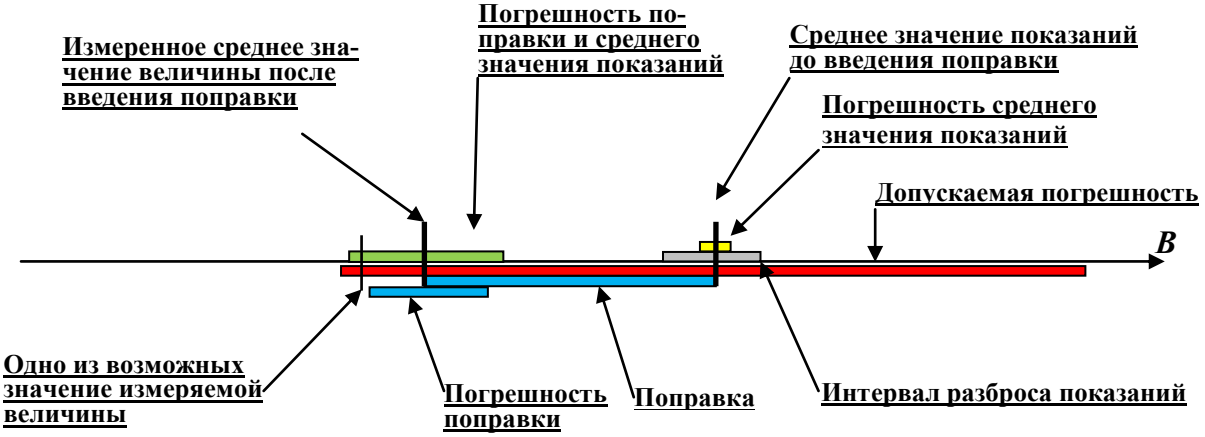


Рисунок 6 – Пример графического отображения на числовой оси элементов реального измерительного процесса

Если бы поправка не была известной, то за измеренное значение следовало бы принять среднее значение показаний поверенного средства измерений, а за погрешность с вероятностью 1 принять нормированное значение допускаемой абсолютной погрешности. При калибровке средства измерений поправка к его показаниям (или отметкам шкалы) становится известной с погрешностью эталона. В этом случае удобно выполнить коррекцию показаний путем введения по-

правки к среднему значению показаний и получить новое (уточненное) измеренное значение величины. При этом погрешность измерений станет близкой к погрешности поправки (погрешности эталона на момент определения поправки), что значительно меньше нормированной допускаемой погрешности поверенного средства измерений.

При выполнении измерений погрешность СИ изменяется и требуется её периодический контроль через интервал, определяемый его *метрологической надежностью*.

В настоящее время на базе теории вероятности и математической статистики формируются два подхода к построению общей теории измерений (к математическому описанию реального измерительного процесса): 1) на основе *концепции неопределенности*; 2) на основе *концепции погрешности*.

Поскольку истинное значение всегда неизвестно, то вокруг случайного измеренного значения величины ***прогнозируется некий интервал возможных истинных значений, каждое из которых обоснованно могло бы быть приписано измеряемой величине***. На практике обычно указывают одно единственное (например, среднее) измеренное значение, но вместе с ним приводят показатели, отражающие степень неопределенности возможного отклонения этого измеренного значения от неизвестного истинного значения величины. Концепция неопределенности измерений строится на логической последовательности: "*неопределенность измерений* (как общее свойство) – *показатели неопределенности - оценка этих показателей*". После введения всех известных поправок *остается неопределенность отклонения наиболее вероятной оценки измеряемой величины от ее истинного значения, выраженная суммарным показателем*.

По определению от 2008 г. "***неопределенность измерений – это неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации***" [26, 32].

Из данного определения следует, что "*параметром*" для множества рассеянных измеренных значений *может быть только интервал на числовой оси*. Такой интервал мы называем "*погрешностью*". Однако ИСО предлагает неопределенность измерений характеризовать следующими тремя её показателями со словом "*неопределенность*" [26, 32]:

1) стандартная *неопределенность*, выраженная в виде стандартного отклонения (СКО);

2) суммарная стандартная *неопределенность*;

3) расширенная *неопределенность* - произведение суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата, зависящий от вероятности.

В зарубежных странах для представления результатов измерений используют преимущественно показатели неопределенности, а термин "*погрешность*" почти не используется. К недостаткам концепции неопределенности следует отнести противоречие в выбранных показателях, в которых осталось слово "*неопределенность*", которое отражает нечто в принципе неопределимое (невычислимое), но, тем не менее, ее предлагают определять (вычислять).

Концепция погрешности положена в основу российских нормативных документов и базируется на понятии "*погрешность измерений*", которая с 2015 г. определяется как "***разность между измеренным значением величины и опорным значением величины***" [19]. Ранее в ГОСТ 16273-70 она определялась как "*разность между измеренным значением величины и истинным значением величины*" [2], а в РМГ 29-99 как "*отклонение результата измерений от истинного (действительного) значения величины*" [20]. Видно, что слово "*опорное значение*" стало заменителем неудачно выбранного словосочетания "*истинное (действительное) значение*".

Концепция погрешности базируется на логической последовательности: "*погрешность - характеристика погрешности - модель погрешности - оценка погрешности*". Погрешность считается известной, если в качестве опорного принято, например, известное при калибровке СИ эталонное значение. Если в качестве опорного принято истинное значение, то значение погрешности считается неизвестным (неопределимым).

В этой концепции предпринята попытка одним термином "*погрешность*" объединить два несовместимых процесса, когда случайное измеренное значение ***приписывается*** неизвестной измеряемой величине и когда это же случайное измеренное значение ***сравнивается*** с другим известным значением величины. Неоднозначность термина "*погрешность*", которому в разных ситуациях может соответствовать и известное (определимое) и неизвестное (неопределимое) значение, приводит к необходимости каждый раз уточнять

смысл этого понятия в каждой конкретной ситуации. Противоречие, оставшееся в определении базового термина, не способствует ясности в понимании сути измерительного процесса, но с этим пока приходится мириться.

Для представления результата измерений понадобился новый термин – "*характеристика погрешности измерений*", то есть характеристика того, что принципиально не определимо, а может быть только оценено. В качестве такой характеристики, например, часто используют "*доверительные границы - интервал, в котором с заданной вероятностью находится погрешность измерений*" [18], что соответствует понятию "*расширенная неопределенность*" в концепции неопределенности.

Поскольку обе рассматриваемые научные концепции отражают два явления – *разброс показаний и неизвестную разность между измеренным и истинным значением величины*, то соответствующим терминам "*случайная погрешность*" и "*систематическая погрешность*" целесообразно придать вероятностный смысл показателей неопределенности. Причем и систематическая погрешность, и случайная погрешность в измерениях присутствуют всегда.

Отметим также, что результатом измерений является интервал, погрешность – это тот же интервал (на это указывает символ "±"), любая поправка вместе с её погрешностью также является интервалом.

Таким образом, чтобы максимально приблизить измеренное значение величины к её истинному значению, необходимо выполнить как можно больше измерений, найти среднее значение зафиксированных показаний прибора и к нему добавить все известные (заранее определенные) поправки в нормальных и рабочих условиях. После чего найти суммарную погрешность и представить результат измерений интервалом для истинного значения измеряемой величины.

Образно говоря, *измерительная деятельность* как реальный измерительный процесс напоминает автомагистраль, по которой "мчится" *средство измерений*. Оно периодически сворачивает с магистрали в *метрологический сервис*, контролирующий текущий уровень его *погрешности*. Диагностика и техосмотр как бы "соответствуют" калибровке и поверке *средства измерений* в процессе *метрологической деятельности*.

1.7 *Шкалы геофизических величин на диаграммах*

При отображении и представлении измерительной информации пользуются шкалами порядка, интервалов и отношений – упорядоченными последовательностями значений величины [30].

Шкалы ***порядка*** представляют собой упорядоченную последовательность реперных точек величины.

Известна, например, 10-балльная минералогическая шкала твердости (сокращенно: тальк - гипс - шпат - апатит - кварц - корунд - алмаз).

Силу землетрясений отражает 12-балльная международная сейсмическая шкала MSK-64 (сокращенно: слабое - умеренное - сильное - разрушительное - уничтожающее - катастрофа).

Пласты горных пород делят на плотные и пористые (коллекторы), а пористые пласты делятся на водонасыщенные, нефтенасыщенные, газонасыщенные. На шкалах порядка отсутствует масштаб и любые математические операции невозможны.

Температурные шкалы Цельсия (^{o}C), Фаренгейта (^{o}F) и Кельвина (^{o}К) относятся к шкалам **интервалов**. На таких шкалах обычно установлен масштаб, но возможны только операции сложения и вычитания.

У температурных шкал разные пары реперных точек.

По шкале Цельсия интервал от "тройной точки" воды до точки ее кипения принят за 100 единиц.

По шкале Фаренгейта интервал от точки таяния льда минус 32 единицы до точки кипения воды принят за 180 единиц.

В Американском нефтяном институте (API) интервал между значениями гамма-активности двух блоков радиоактивных горных пород, пересеченных скважиной, принят за 200 единиц "эй-пи-ай" (units API) [35].

Шкалы **отношений** – самые распространенные, используются при сравнении величины с ее значением, принятым за единицу. На них возможны любые математические операции.

Дальнейшее изложение основ метрологии будет относиться в основном к шкалам отношений.

Таким образом, на основании рассмотренных основных положений науки об измерениях можно сделать следующий важный вывод:

при выполнении любых геофизических измерений всегда ищем два числа:

1) измеренное значение, зависящее от выбранной модели объекта и выбранной единицы величины;

2) погрешность в виде интервала (в той же выбранной единице величины), ширина которого зависит от выбранной доверительной вероятности (вероятность указывается как третье число).

2 Неопределенность и погрешность геофизических измерений

Напомним, что в теории измерений постулируется существование "*истинного значения измеряемой величины*", определение которого невозможно вследствие неидеальности измерительного процесса и "*математического ожидания случайных измеренных значений величины*", которое определить также невозможно. Соответственно, рассматриваются два вида неопределенности: 1) **неопределенность истинного значения** величины; 2) **неопределенность математического ожидания** измеренных значений этой величины. На практике измерения сводятся к поиску минимального по ширине интервала, которым можно накрыть ("поймать") неизвестную измеряемую величину (ее истинное значение) в условиях влияния систематических и случайных факторов.

2.1 Систематические и случайные эффекты

Степень *неопределенности* отклонения каждого измеренного значения величины от его истинного значения в измерительном процессе в момент измерения зависит от соотношения не проявленного (невидимого) в процессе измерений *систематического эффекта* и проявленного *случайного эффекта* воздействия факторов.

Случайные эффекты вызывают *рассеяние измеренных значений* величины, полученных непосредственно в процессе реализации методики измерений или *рассеяние показаний* средства измерений.

К источникам неопределенности измерений от случайных эффектов относят:

1) случайные изменения (колебания) *показаний СИ в нормальных условиях*;

2) изменения (колебания) *показаний СИ* при случайных колебаниях одной или нескольких влияющих величин относительно их нормальных значений;

3) случайные изменения *измеряемой величины* при случайных колебаниях одной или нескольких влияющих величин относительно их нормальных значений;

4) случайность цифры, отбрасываемой при представлении измеренного значения ограниченной разрядностью цифрового табло средства измерений.

На практике количество измеренных значений всегда ограничено, довести его до бесконечности не представляется возможным. Значит, увеличением числа измерений влияние случайных эффектов на результат измерений может быть только сведено к минимуму, но не может быть полностью исключено.

Систематические эффекты не вызывают разброса измеренных значений непосредственно в процессе измерений, а их совместное воздействие вызывает лишь смещение среднего измеренного значения относительно истинного значения. Это смещение в завершенном измерительном процессе остается неизвестным (неопределенным), о его возможных значениях можно судить только на основе *вероятностных* представлений, рассматривая это смещение как случайную величину. Влияние систематических эффектов на результат измерений может быть только сведено к минимуму введением поправок, но не может быть полностью исключено.

2.2 Неопределенность как общее свойство измерений

При представлении результата измерений величины помимо измеренного значения следует одновременно указывать показатель качества, отражающий степень неопределенности его отклонения от истинного значения.

Свойство измерений обладать *неопределенностью* отклонения измеренного значения величины от её истинного значения *является* ***общим свойством*** *любых измерений*. Его часто отождествляют с понятиями "*неточность измерений*" или "*погрешность измерений*".

Хотя *погрешность* измерений ранее трактовалась как "*разность между измеренным и истинным значением величины*", на практике специалисты в области измерений всё же понимали и продолжают понимать её как ***неопределённость этой разности****, на что указывает наличие знака* "±" перед числовым значением погрешности при представлении результата измерений. Ведь истинное значение величины в любом случае остается неизвестным. Поэтому созданная теория измерений на основе того, что заведомо никогда неизвестно и неопределимо, всегда оставалась уязвимой.

С целью устранения возникшего терминологического противоречия Международная организация по стандартизации (ISO) в 1991 г. предложила вместе с укоренившимся понятием"*погрешность измерений*" для отражения **свойства** "*неопределенности измерений*" использовать **параметр** с тем же самым названием "*неопределенность*".

2.3 Дефинициальная неопределенность

Как упоминалось в разделе 1.3, до начала измерений необходимо дать четкое определение измеряемой величине с учетом тех ограничений, которые можно выделить при оценке степени адекватности модели объекта реальному объекту измерений.

Выделяют особый вид неопределенности – "***дефинициальную неопределенность измерений – составляющую неопределенности, являющуюся результатом ограниченной детализации в определении измеряемой величины***". Она показывает практический минимум погрешности при отсутствии влияния всех остальных эффектов. Любое изменение детализации в определении измеряемой величины приведет к другим показателям дефинициальной неопределенности. Оценивать ее чрезвычайно трудно, а иногда невозможно.

2.4 Погрешность как показатель неопределенности

Погрешность измерений фактически отражает тот "**грех измерений**" (грех за отклонение от истины), который количественно всегда остается неизвестным (*неопределенным*) в завершенном измерительном процессе. О степени отклонения измеренного значения величины от ее истинного значения можно судить по результатам поверки средств измерений с использованием эталонов, по результатам аттестации МИ с использованием референтной МИ или при математическом моделировании измерений.

Однако ранее при разработке основ теории измерений погрешностью было принято считать "*разность между измеренным и истинным значением величины*". Поскольку эта разность всегда остается неизвестной (неопределенной), то при представлении результата измерений вынуждены были использовать вероятностные и статистические "*характеристики погрешности*".

Поскольку на измеренное значение величины влияют все те же систематические и случайные факторы, то в качестве характеристик погрешности были выбраны характеристики:

- СКО для случайной погрешности измерений – аналог *стандартной неопределенности*;

- доверительный интервал для систематической погрешности измерений или для общей (суммарной) погрешности – аналог *расширенной неопределенности*.

Практически во всех основных российских нормативных документах показатели точности (неопределенности) измерений часто представлены этими двумя характеристиками. Однако в сознании людей оставалось противоречие между неопределимой (по определению) погрешностью и определяемыми характеристиками со словом "*погрешность*". Очень часто в паспортах на измерительные приборы можно встретить запись показателя их точности, как, например, "Допускаемая относительная погрешность ±2%".

Как упоминалось, это противоречие вызвало появление альтернативной "*концепции неопределенности*". Поэтому, чтобы не менять терминологию в российских документах, следует понятию "*погрешность*" придать вероятностный смысл в соответствии с ее практическим применением, поскольку измеренное значение – это всегда случайная величина.

Несмотря на существование классического определения понятия "*погрешность измерений*", в российских нормативных документах *неопределенность измерений* устойчиво принято отражать двумя основными показателями точности измерений:

1) *систематической погрешностью измерений* (для отражения влияния систематических эффектов на измеренное значение);

2) *случайной погрешностью измерений* (для отражения степени рассеяния измеренных значений под влиянием случайных эффектов на средство измерений).

Никто не отрицает воздействия на измерительный процесс случайных и систематических эффектов (факторов). Деление погрешности на систематическую и случайную составляющие является фундаментальным – обе составляющие в измерениях в той или иной степени присутствуют всегда. Это даже не составляющие, а два принципиально разных вида погрешности измерений, их следовало бы указывать в результате измерений по отдельности (без объединения, как это делается, например, для высокоточных эталонов). Если какой-то вид погрешности при представлении результата измерений не указан, то по умолчанию такая погрешность считается несущественной.

Признаком погрешности является наличие знака "±" перед числом. Этот знак показывает, что погрешность (как интервал) в два раза больше числа, которым она выражена. Однако сама погрешность измерений может отражать качество измерений как случайной величиной (расчетная оценка погрешности), так и неслучайной величиной (нормированная допускаемая погрешность).

Эти два вида погрешности считаются основными показателями качества (показателями точности) измерений величины, а для эталонов - показателями качества (показателями точности) воспроизведения единицы величины.

2.5 Систематическая погрешность и ее модели

Один из "*грехов*" измерений обусловлен систематическими эффектами и заключается он в том, что любое принятое измеренное значение всегда отличается от *неизвестного истинного значения* измеряемой величины.

Рекомендованное в [19] определение термина "*систематическая погрешность измерений – составляющая погрешности измерений, принимаемая за постоянную или закономерно изменяющуюся*" не позволяет использовать его в качестве показателя точности измерений.

Учитывая тот реальный физический смысл, который на практике вкладывается в этот показатель качества измерений, для систематической погрешности можно сформулировать следующее определение [13].

Систематическая погрешность – показатель неопределенности измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между измеренным значением величины и ее истинным значением с вероятностью, не менее заданной.

Поскольку истинное значение измеряемой величины всегда неизвестно, то рассматриваемая разность может иметь только вероятностный смысл. Поэтому отражением в результате измерений систематической погрешности возможно только интервалом с указанием доверительной вероятности.

В концепции неопределенности систематической погрешности соответствует неопределенность, определяемая способом "В" (например, вероятностным или каким-то другим способом).

Систематическая погрешность может состоять из нескольких составляющих, требующих последующего их объединения в единый показатель при представлении результата измерений. Для суммирования составляющих систематической погрешности измерений каждая отдельная неслучайная систематическая погрешность преобразуется в случайную величину, выраженную средним квадратическим отклонением σ. Поскольку реальное рассеяние величины при измерениях отсутствует, то приходится моделировать это абстрактное рассеяние математическими методами.

Под математической моделью систематической погрешности измерений понимают описание (функцию) распределения отклонения той доли измеренных значений относительно центра их распределения (математического ожидания измеренных значений), которые не менялись при повторных измерениях. Функция распределения этих абстрактных измеренных значений показывает, с какой вероятностью они принимали бы те или иные числовые значения.

В качестве вероятностной характеристики систематической погрешности используется *дифференциальная функция распределения*, иначе называемая ***плотностью вероятности***. Такая модель должна быть центрированной, усеченной и одномодальной (с одним центром распределения) [9, 23].

Использование на практике вероятностного подхода к моделированию систематической погрешности, прежде всего, предполагает выбор в качестве её модели какого-либо известного теоретического закона распределения случайной величины, например, прямоугольного, треугольного или нормального распределения плотности вероятностей.

Модель равномерной плотности распределения. Равномерное распределение имеют рассеянные показания от квантования в цифровых приборах, от округления при расчетах и отсчета показаний между соседними отметками шкалы стрелочного прибора. При измерении одной и той же величины показания совокупности однотипных средств измерений, для которых погрешности регламентированы допускаемыми пределами, также предполагаются равномерно распределенными в установленных (нормированных) пределах. Этот закон

является симметричным, одномодальным и усеченным, его выбирают в случае надежной оценки погрешности "сверху", так как СКО в этом случае принимает максимальное значение.

График плотности вероятности равномерного распределения отклонения измеряемой величины от измеренного значения показан на рисунке 7.

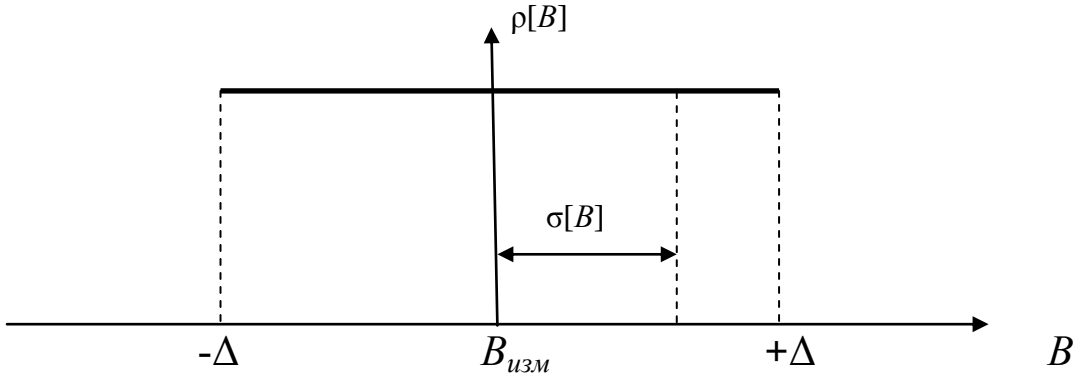


Рисунок 7 – График плотности вероятности равномерного распределения отклонения измеряемой величины от измеренного значения

СКО вероятных измеренных значений относительно принятого измеренного значения вычисляют по следующей формуле:

$$\sigma[\mathrm{B}] = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}\,. \qquad (6)$$

Известно, что композиция двух равномерных законов распределения в равных интервалах описывается треугольным распределением Симпсона и неравных интервалах - трапецеидальным распределением [1, 28, 33].

Модель треугольного распределения (Симпсона). Треугольное распределение является симметричным, одномодальным и усеченным. Его можно выбирать тогда, когда заведомо известно, что при поверке и в процессе эксплуатации однотипных СИ обеспечивается их годность по погрешности с вероятностью 1. В этом случае оценка погрешности менее надежна, так как СКО значительно меньше, чем в случае равномерного распределения.

График плотности вероятности треугольного распределения отклонения измеряемой величины от измеренного значения показан на рисунке 8.

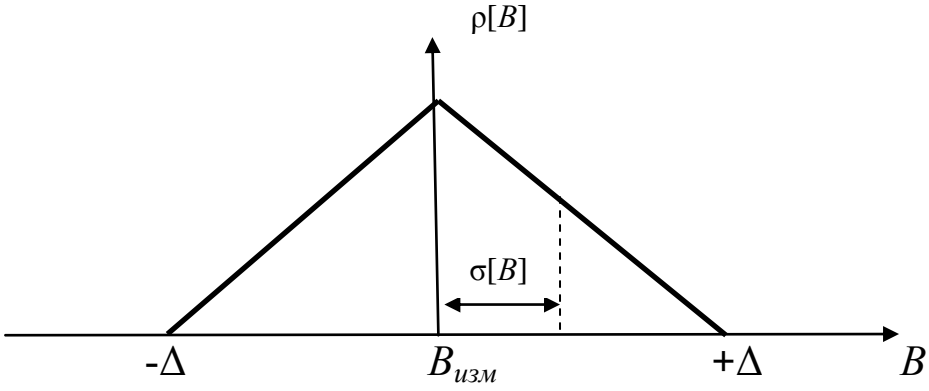


Рисунок 8 – График плотности вероятности распределения Симпсона

СКО вероятных измеренных значений относительно принятого измеренного значения вычисляют по следующей формуле:

$$\sigma[\mathrm{B}] = \frac{\Delta}{\sqrt{6}}. \qquad (7)$$

Объединенная модель распределения плотности вероятности от двух и более распределений Симпсона или четырех и более равномерных законов приближается к нормальному закону Гаусса.

Нормальное распределение. Наибольшее внимание в теории вероятности уделяется **нормальному** (куполообразному) закону плотности распределения, называемому часто распределением Гаусса. Широкое использование нормального распределения на практике объясняется центральной предельной теоремой теории вероятностей [11]. Утверждается, что распределение измеренных значений будет близко к нормальному всякий раз, когда они формируются под действием большого числа независимо действующих факторов. Причем каждый из них оказывает лишь незначительное действие на разброс по сравнению с суммарным действием всех остальных факторов. Значения функции нормированного нормального распределения сведены в таблицы [1, 2, 27].

Если имеются предположения об усеченном нормальном законе распределения истинного значения поправки в том же интервале **±Δ**, то СКО вычисляют по следующей формуле:

$$\sigma[\text{B}] = \frac{\Delta}{3}. \quad (8)$$

Нормальным законом рекомендуется пользоваться при объединении более 4-х составляющих систематической погрешности для представления результата измерений.

2.6 Случайная погрешность и ее модели

Случайные эффекты порождают разброс измеренных значений или показаний средства измерений.

Анализ случайной погрешности происходит после выполнения измерений, то есть после того, как все показания считаны или все измеренные значения получены. Поэтому, ISO, например, рекомендует степень близости измеренных значений (показаний) друг к другу называть особым словом "*прецизионность*", которое в зависимости от условий измерений конкретизируется еще двумя терминами "*повторяемость (сходимость)*" и "*воспроизводимость*" [1, 3, 11, 27]. Следовательно, случайная погрешность при выполнении измерений оценивается отдельно в условиях сходимости показаний и в условиях воспроизводимости измеренных значений.

Образно говоря, "*грех*" измерений здесь заключается лишь в том, что количество считываемых показаний (измеренных значений) не может быть доведено до бесконечности. За измеренное значение приходится принимать не*математическое ожидание* показаний, а лишь одно из случайных средних значений. Каждый раз при очередном повторном наборе показаний субъект получает другое среднее измеренное значение величины. В итоге мог бы появиться ряд (разброс) случайных средних измеренных значений величины, характеризующий случайную погрешность измерений. Однако для представления результата измерений находят только единственное среднее значение, что и вызывает неопределенность измерений.

При устремлении количества показаний к бесконечности случайная погрешность стремится к нулю.

Рекомендованное в [19] определение термина "*случайная погрешность измерений – составляющая погрешности измерений, изменяющаяся случайным образом*" не позволяют использовать её в качестве показателя точности при представлении результата измерений. Чтобы она могла быть использована в этом качестве, ей необходимо сформулировать определение на основе её вероятностной природы.

Случайная погрешность – показатель неопределенности измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между средним измеренным значением величины и математическим ожиданием показаний (или измеренных значений) с вероятностью не менее заданной.

Поскольку математическое ожидание (как бы истинное значение) показаний всегда неизвестно, то рассматриваемая разность может иметь только вероятностный смысл. Поэтому в результате измерений эта погрешность может быть отражена только интервалом с указанием доверительной вероятности.

Поскольку в большинстве случаев измерения выполняются в условиях повторяемости (сходимости) [3, 11], то определение случайной погрешности при необходимости можно конкретизировать:

Случайная погрешность в условиях повторяемости - показатель качества измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между средним измеренным значением величины, полученным одним средством измерений (или одним методом или одной лабораторией) в одних и тех же условиях, и математическим ожиданием показаний (или измеренных значений) с заданной вероятностью.

В случае когда измерения одной и той же величины выполняются несколькими разными методами и средствами измерений или в разных лабораториях, а за результирующее измеренное значение принимается среднее арифметическое полученных измеренных значений, то случайная погрешность отражает измерительный процесс уже в условиях воспроизводимости.

Случайная погрешность в условиях воспроизводимости – показатель качества измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между средним измеренным значением величины, полученным разными средствами измерений (разными методами или разными лабораториями), и математическим ожиданием измеренных значений с заданной вероятностью.

При необходимости дальнейшего суммирования составляющих погрешности измерений случайная погрешность может быть выражена выборочным стандартным отклонением S для среднего измеренного значения.

Если случайная погрешность измерений, например, существенно преобладает над систематической погрешностью и определена надежная (количество показаний более 30) оценка среднего квадратического отклонения σ, то для нормального закона распределения эта погрешность измерений может быть представлена интервалами как $\pm\sigma$ при вероятности P=0,68, или как $\pm 2\cdot\sigma$ при P=0,95, или как $\pm 3\cdot\sigma$ при P=0,997.

Случайная погрешность (как характеристика прецизионности измерений) не имеет составляющих, она обусловлена только одной причиной – ограниченностью количества измеренных значений за конкретный период времени измерений (при одновременном воздействии всех случайных эффектов).

Если бы была возможность получить реальную непрерывную функцию распределения при бесконечном количестве показаний, то она содержала бы полную информацию о случайных измеренных значениях величины.

Поскольку это невозможно, то модель случайной погрешности всегда представляет собой экспериментальную дискретную (ступенчатую) функцию распределения в виде гистограммы.

Пример модели случайной погрешности в виде гистограммы плотности вероятности измеренных значений, построенной на основе экспериментальных данных, показан на рисунке 9.

Рассеяние измеренных значений величины B характеризуют СКО, оценку которого вычисляют по формуле

$$\tilde{\sigma}[\dot{\Delta}B] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(B_i - \overline{B})^2}{n-1}} \,. \qquad (9)$$

Если выполнить новую серию измерений той же самой неизменной величины, то получим новое среднее измеренное значение и новую оценку СКО. Значит *полностью избавиться от случайной составляющей погрешности невозможно*.

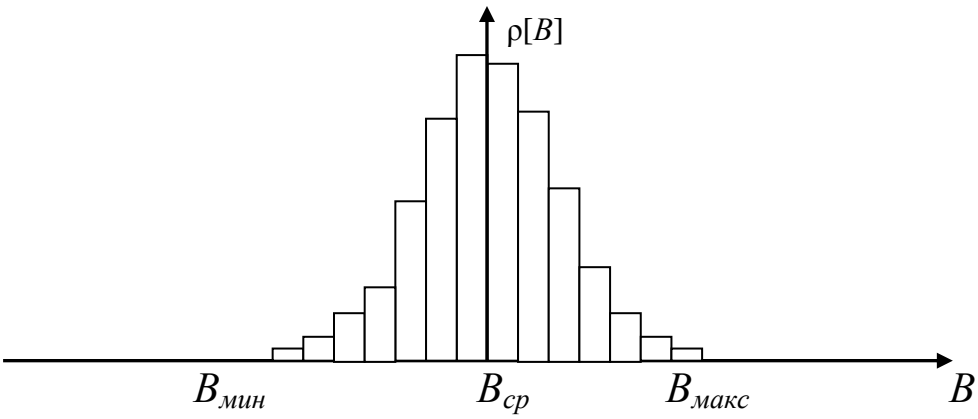


Рисунок 9 – Гистограмма распределения плотности вероятностей

Оценку СКО средних измеренных значений параметра относительно оценки математического ожидания вычисляют по формуле

$$\tilde{\sigma}[\dot{\Delta}\overline{B}] = \frac{\tilde{\sigma}[\dot{\Delta}B]}{\sqrt{n}} . \qquad (10)$$

Таким образом, формула (9) показывает уровень сходимости измеренных значений, который используется при представлении результата однократного измерения при условии, когда СКО подобных многократных измерений было оценено до выполнения этого (одного) измерения. Формула (10) позволяет оценить долю случайной погрешности при оценке общей погрешности выполненных измерений.

Видно, что СКО вычисленных средних измеренных значений параметра в $\sqrt{n}$ меньше СКО самих измеренных значений величины.

Однако построение модели распределения в виде гистограмм требует большого количества измеренных значений, что не всегда возможно.

Для того чтобы выразить случайную погрешность измерений доверительным интервалом при количестве измеренных значений менее 30, используют ***распределение Стьюдента***. Оно описывает плотность распределения вероятности среднего арифметического, вычисленного по выборке из *n* случайных отсчетов нормально распределенной генеральной совокупности. Его вид зависит от числа отсчетов *n*, по которым находится среднее арифметическое значение, поэтому иногда говорят о *семействе законов* распределения Стьюдента. При увеличении *n* это распределение переходит в распределение Гаусса. При $n \leq 3$ их СКО очень велико, то есть дисперсионная

оценка разброса измеренных значений почти перестает существовать. Измеренных значений всегда должно быть более 3.

Случайную абсолютную погрешность полученного среднего измеренного значения находят по формуле

$$\dot{\Delta}_P(\overline{B}) = \pm t_P \cdot \tilde{\sigma}[\dot{\Delta}\overline{B}], \qquad (11)$$

где t_P – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности P и количестве измеренных значений n, выбранных из таблицы 1;
$\tilde{\sigma}[\dot{\Delta}\overline{B}]$ – оценка СКО погрешности среднего значения, вычисленного по формуле (10).

Таблица 1 – Значения коэффициента t_p для случайной величины, имеющей распределение Стьюдента с *n-1* степенями свободы

n-1	*P*= 0,95	*P*= 0,99	*n*-1	*P*= 0,95	*P*= 0,99
3	**3,182**	***5,841***	16	**2,120**	***2,921***
4	**2,776**	***4,604***	18	**2,101**	***2,878***
5	**2,571**	***4,032***	20	**2,086**	***2,845***
6	**2,447**	***3,707***	22	**2,074**	***2,819***
7	**2,365**	***3,499***	24	**2,064**	***2,797***
8	**2,306**	***3,355***	26	**2,056**	***2,779***
9	**2,262**	***3,250***	28	**2,048**	***2,763***
10	**2,228**	***3,169***	30	**2,043**	***2,750***
12	**2,179**	***3,055***	∞	**1,960**	***2,576***
14	**2,145**	***2,977***			

На практике часто имеют не более 10 измеренных значений какого-либо параметра. Например, если считать 10 чисел от 0,1 до 1,0 с шагом 0,1 измеренными значениями величины B в единицах [B] с несущественной систематической погрешностью, то среднее арифметическое измеренное значение равно 0,55·[B]; СКО для среднего значения равно 0,09574 [B]. При n=10 и вероятности 0,95 коэффициент Стьюдента равен 2,26. Тогда случайная составляющая абсолютной погрешности измерений равна ±0,216 [B].

$$\dot{\Delta}_{0,95}(x) = \pm 2{,}26 \cdot 0{,}09574 = \pm 0{,}216 \cdot [B]$$

и результат измерений может быть представлен в виде

$$B = (5{,}50 \pm 0{,}22) \cdot [B]; P = 0{,}95.$$

Если доверительную вероятность увеличить до 0,99, то коэффициент Стьюдента равен 3,25, доверительный интервал равен ±0,311 [*B*] и результат измерений уже будет другой:

$$B = (5{,}50 \pm 0{,}31) \cdot [B]; P = 0{,}99 .$$

Если количество измерений увеличить в три раза (например, 30), то интервал для истинного значения уменьшится всего на 10 %.

Из этого примера видно, что погрешности выражают разными числовыми значениями при разной доверительной вероятности. Причем в первом случае интервал для истинного значения равен от 5,28 до 5,72, а во втором – от 5,19 до 5,81. Чем выше заданная вероятность, тем шире вычисленный интервал. На практике ограничиваются заданной вероятностью 0,95 или 0,997. Обработка измеренных значений параметра выполнена вероятностными методами с оценкой сверху, следовательно, ***границы для истинного значения измеряемой величины не могут быть абсолютно точными***.

Случайная погрешность всегда оценивается на основе статистических методов обработки показаний. Она представляется двумя числами: числом вместе со знаком "±" и с указанием обозначения единицы величины [*B*]; значением вероятности *P* нахождения математического ожидания показаний в пределах выбранного интервала. Если измерения одной и той же величины выполняются во времени несколькими рядами неравноточных измерений (с разными дисперсиями), то определяют средневзвешенное измеренное значение и средневзвешенное СКО [2, 11, 30].

Модели случайной погрешности измерений в виде гистограммы целесообразно указывать лишь при проведении высокоточных и ответственных измерений, а также в случаях, когда по условиям задачи необходимо сравнивать (сопоставлять) мало отличающиеся друг от друга измеряемые величины, например при сличении эталонов.

В измерительной практике часто используют один объединенный показатель точности – интервал, отражающий одновременно влияние систематических и случайных эффектов, с указанием вероятности попадания истинного значения в этот объединенный интервал.

2.7 Нормированная допускаемая погрешность

Оценить погрешность измерений можно только расчетным путем. Но на практике часто для удобства поступают так: чтобы каждый раз не вычислять погрешность, для нее заранее регламентируют норму на допускаемую погрешность при фиксированных условиях измерений и периодически при поверке осуществляют подтверждение соответствия СИ нормированным показателям точности.

Нормированная допускаемая погрешность измерений - это заранее установленный (нормированный) интервал, в котором разность между будущим измеренным значением величины и ее истинным значением окажется с вероятностью 1. В документации на СИ и МВИ ее выражают допускаемой погрешностью. Вероятность при этом не указывается и считается равной 1 по умолчанию.

В концепции неопределенности аналогом нормированной погрешности является ***целевая неопределенность*** – "*верхняя граница неопределенности измерений, заранее установленная, исходя из предполагаемого использования результатов измерений*".

Случайную погрешность измерений нормируют редко, но иногда ее экспериментальная оценка может быть получена заранее до выполнения будущего однократного измерения.

Следует отметить, что для совокупности измерений, выполняемых по одной и той же стандартной методике, возможно применение приписанной максимальной погрешности при вероятности менее 1.

Состояние измерений, при которых оцененные погрешности не выходят за нормированные пределы, является одним из условий обеспечения единства измерений.

При представлении результата измерений с использованием допускаемой погрешности выход измеряемой величины за границы нормированного интервала не предполагается.

Чтобы это требование выполнялось с вероятностью 1, полученная при поверке оценка поправки не должна превышать разности между допускаемой погрешностью поверяемого СИ и допускаемой погрешностью эталона.

Таким образом, технические измерения выполняются при условии, когда в течение установленного межповерочного интервала реальные оцененные погрешности всегда надежно остаются меньше допускаемой погрешности с вероятностью 1.

На рисунке 10 изображена числовая ось измеряемой величины *B*, на которой показано измеренное значение и условно отмечена (якобы известная) измеряемая величина как имеющая наименее вероятное значение.

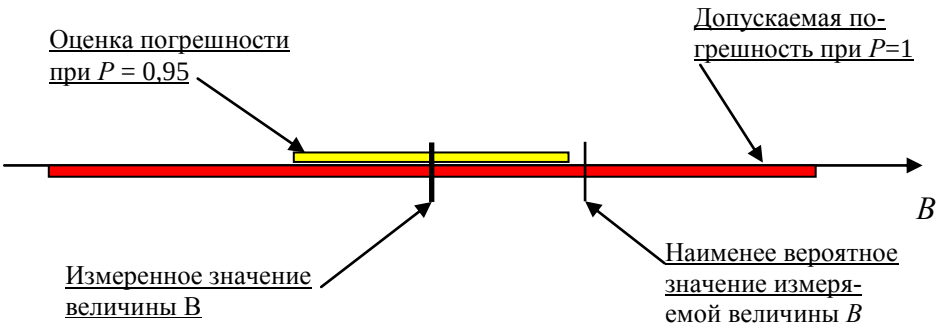


Рисунок 10 – Графическое отображение измеренного значения величины с оцененной и допускаемой погрешностью

Полосками указаны вычисленные оценки абсолютной погрешности (короткая полоска) и нормированная допускаемая абсолютная погрешность измерений (длинная полоска).

Вычисленная **оценка суммарной погрешности** на числовой оси отражается двумя точками, симметричными относительно измеренного значения.

Указывается также вероятность в долях единицы, например рекомендуемое значение *P* = 0,95. Такая оценка вычисляется по отдельным составляющим погрешности в соответствии с принятой "*методикой измерений*".

Допускаемая погрешность не вычисляется, а нормируется (устанавливается) до выполнения технических измерений.

На рисунке 5 видно, что допускаемая погрешность может быть сколь угодно больше оцененной погрешности и измеряемая величина всегда находится в этих допускаемых границах с вероятностью 1. Видно также, что измеряемая величина может не оказаться в вычисленном для нее интервале.

Основным отличительным признаком оцененной и нормированной погрешности являются разные показатели вероятности: для оценки погрешности он меньше 1; для нормированной погрешности он равен 1.

Для сравнения условные обозначения и определения "*оцененной погрешности*" и допускаемой "*нормированной погрешности*" измере-

ний или средств измерений с их отличительными особенностями сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение оцененной и нормированной погрешности

Вид измерений	Форма представления погрешности	Обозначение абсолютной погрешности	Определение погрешности в зависимости от вероятности
Лабораторные	Оценка абсолютной погрешности	$\pm\tilde{\Delta}_{0,95}\cdot[B]$	Вычисленный при заданной доверительной вероятности интервал, в котором могла бы оказаться разность между измеренным и истинным значением измеряемой величины (после выполнения измерений).
Технические	Допускаемая абсолютная погрешность	$\pm\Delta_{1,0}\cdot[B]$ или $\pm\Delta_{op}\cdot[B]$	Установленный интервал, в котором будущая разность между измеренным и истинным значением измеряемой величины окажется с вероятностью 1.

При упоминании слова "*погрешность*" приходится всегда уточнять, о чем идет речь – о вычисленной оценке или о нормированной допускаемой погрешности. Если в результате измерений указана доверительная вероятность, это означает, что речь идет о вычисленной оценке погрешности. Если доверительная вероятность не указана, то погрешность нормирована и указана для вероятности $P = 1$ по умолчанию.

Таким образом, вычисленные погрешности следует рассматривать как случайные величины, так как они принимают разные вычисленные значения при каждой новой реализации измерительного процесса. Нормированные пределы погрешности - это не случайные величины, они не вычисляются и, соответственно, не меняются при повторных измерениях.

Для нормированной допускаемой погрешности в документации бессмысленно указывать более двух значащих цифр. При нормировании погрешности СИ следует, по возможности, обходиться одной значащей цифрой.

Таким образом, ***СИ должны периодически подвергаться поверке, то есть контролю выполнения условия, чтобы их оцененная погрешность всегда была меньше допускаемой (нормированной) погрешности с вероятностью 1***.

2.8 Суммарная погрешность и достоверность измерений

Задача объединения составляющих погрешности может возникнуть как до, так и после выполнения прямых или косвенных измерений какого-либо параметра. *Ее решение на уровне классической теории измерений пока находится в стадии осмысления и разработки*.

Суммирование составляющих погрешности не требуется при выполнении значительной части технических измерений, когда общие погрешности представлены допускаемой погрешностью (при $P=1$) или классом точности.

Объединение погрешностей (интервалов) потребуется, если условия измерений отличаются от условий передачи единицы, и имеется информация о других источниках неопределенности, представленной, как правило, совокупностью нормированных погрешностей.

Объединение нормированных погрешностей основано на предположении, что разность между измеренным и истинным значением величины могла бы принимать случайные значения величины, равномерно распределенной в пределах нормированного интервала по каждому влияющему фактору. В соответствии с предельной теоремой объединенный закон распределения нескольких случайных величин стремится к нормальному закону.

При суммировании придерживаются ***принципа "оценки сверху"***. Предполагается, что оцененная суммарная погрешность (интервал) принимается чуть больше расчетной в надежде на то, что вероятность попадания истинного значения измеряемой величины в этот интервал может оказаться чуть выше принятой вероятности.

В основу суммирования составляющих погрешности в современной метрологии положены принципы, заимствованные из теории вероятностей и математической статистики. При суммировании любых составляющих погрешности действует правило: ***общая дисперсия нескольких независимых случайных величин равна сумме дисперсий каждой из них***.

Обычное арифметическое суммирование погрешностей дает слишком завышенную погрешность измерений с вероятностью 1. Результат измерений с такими погрешностями считается грубым и имеет заниженную ценность. Тем не менее, существует устойчивая рекомендация**: две составляющие систематической погрешности суммировать арифметически**.

Существует общая рекомендация по несущественности отдельных составляющих погрешности – отличие дисперсий не менее чем в 10 раз, или различие оценок СКО более чем в 3 раза.

Суммирование случайных погрешностей

В обычных прямых многократных измерениях выявляют одну случайную составляющую, которую почти всегда объединяют с общей систематической погрешностью. В редком случае, когда случайная составляющая погрешности больше суммарной систематической погрешности в 8 и более раз, то систематические погрешности можно считать несущественными.

В случае измерений, в процессе которых поправки определены экспериментально и их случайные составляющие погрешности оказались существенными и выраженными своими оценками СКО, то оценку СКО суммарной случайной составляющей погрешности измерений величины *B* определяют по следующей формуле:

$$\tilde{\sigma}[B] = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \tilde{\sigma}_i^2} \quad , \qquad (12)$$

где $\tilde{\sigma}_i$ – оценка СКО *i*-той случайной составляющей погрешности; *n* – число случайных составляющих погрешности.

При представлении результата измерений могут быть использованы одна или две или три сигмы, оцененные по формуле (12).

Суммирование систематических погрешностей

Основные принципы и методы суммирования погрешностей прямых измерений, применяемые в *российских* документах, были впервые регламентированы ГОСТ 8.207-76 "ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Общие положения".

При прямых однократных измерениях все составляющие систематической погрешности обычно считаются существенными, а случайная погрешность считается пренебрежимо малой, если она в 8 раз меньше наименьшей систематической составляющей. Обычно рассматривают следующие составляющие систематической погрешности: погрешность переданной и хранимой единицы величины; погрешности, обусловленные отличием рабочих условий измерений от

условий, принятых за нормальные условия. Каждая составляющая погрешности может быть выражена допускаемой основной и дополнительной погрешностью или оценками погрешности (с вероятностью 0,997).

Принято также считать, что поправки, если бы они были определены для каждой систематической составляющей погрешности, были бы распределенными по равномерному закону в пределах соответствующего интервала.

Суммарную погрешность измерения Δ_P вычисляют по формуле

$$\Delta_P = \pm k_P \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \Delta_i^2}\ , \qquad (13)$$

где Δ_i – i-тая систематическая составляющая погрешности; k_P – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью;
m – количество составляющих систематической погрешности.

Коэффициент k_P при разной доверительной вероятности P для разного количества составляющих m выбирают в соответствии с таблицей 3.

Доверительную вероятность для вычисления суммарной систематической погрешности рекомендуют принимать той же, что при вычислении случайной погрешности измерения, обычно P=0,997.

Таблица 3 – Коэффициент k_P при разной вероятности P

Доверительная вероятность P	Количество составляющих погрешности			
	2	3	4	5
0,90	***0,97***	***0,95***	***0,95***	***0,95***
0,95	***1,10***	***1,12***	***1,12***	***1,12***
0,99	***1,27***	***1,37***	***1,41***	***1,42***

Рекомендации ISO основаны на суммировании дисперсий составляющих погрешности и использовании предельной теоремы теории вероятностей для оценки доверительного интервала.

Если руководствоваться "оценкой сверху" и считать, что вероятный разброс показаний СИ от каждого систематического эффекта мог бы быть распределенным равномерно и (или) по закону Симпсона, то суммарную погрешность измерения Δ_P вычисляют по формуле

$$\Delta_P = \pm k_P \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta_i^2}{3} + \sum_{j=1}^{q} \frac{\Delta_j^2}{6}}\ , \qquad (14)$$

где k_P – коэффициент охвата, определяемый принятой доверительной вероятностью P (обычно $k_{0,95}$=2 при P=0,95 и $k_{0,997}$=3 при P=0,997);
Δ_i – интервал для i-й систематической составляющей погрешности при равномерном распределении измеренных значений;
m – количество составляющих систематической погрешности, распределенных равномерно;
Δ_j – интервал для j-й систематической составляющей погрешности при распределении измеренных значений по закону Симпсона;
q – количество составляющих систематической погрешности, распределенных по закону Симпсона.

Суммирование систематических и случайных погрешностей

Далее анализу подвергаются систематические погрешности, которые имеются всегда. В *российских документах* они обычно выражены нормированными пределами допускаемой погрешности средств измерений, указанными в паспорте СИ. Иногда в нормированном пределе содержится доля собственной случайной погрешности СИ, которая перейдет в разброс измеренных значений, и оставшаяся доля систематической погрешности будет меньше предельной. Если известны погрешности СИ, указанные, например, в сертификате о его калибровке, то они должны быть приведены к доверительной вероятности оцененной случайной погрешности.

При прямых многократных измерениях все систематические составляющие погрешности считаются существенными и случайная составляющая погрешности меньше суммарной оценки систематической погрешности менее чем в 8 раз. Суммарная оценка систематической погрешности и оценка случайной погрешности должны быть приведены к одной и той же вероятности. Суммарную оценку погрешности измерения находят путем построения композиции распределений показаний, изменяющихся от случайных и систематических эффектов.

Общая суммарная оценка погрешности при ответственных измерениях, например, в научных исследованиях, вычисляется по следующей формуле [19]:

$$\Delta = \pm\left(\frac{t_P\cdot\sigma + k\cdot\sqrt{\sum\Delta_i^2}}{\sigma + \sqrt{\frac{\sum\Delta_i^2}{3}}}\cdot\sqrt{\sigma^2 + \frac{\sum\Delta_i^2}{3}}\right), \qquad (15)$$

где t_P – коэффициент Стьюдента при $n \leq 30$; k – коэффициент, использованный при оценивании суммарной систематической погрешности; Δ_i –допускаемая i-я составляющая систематической погрешности; σ – оценка СКО случайной погрешности среднего измеренного значения, вычисленная по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{n\cdot(n-1)}}, \qquad (16)$$

где X_i – i-е измеренное значение величины; $\bar{X}$ – среднее измеренное значение величины; n – общее количество измеренных значений.

Рекомендация ISO суммирования систематических и случайных составляющих погрешности основана на суммировании дисперсий составляющих погрешности и использовании предельной теоремы для оценки доверительного интервала.

Суммарную погрешность измерения Δ_P вычисляют по формуле

$$\Delta_P = \pm k_P \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\frac{\Delta_i^2}{3} + \sum_{j=1}^{q}\frac{\Delta_j^2}{6} + \sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2}\ , \qquad (17)$$

где k_P – коэффициент охвата, определяемый принятой доверительной вероятностью P ($k_{0,95}$=2 или $k_{0,997}$=3), и остальные обозначения как в формулах (16) и (18).

В обоснованных случаях иногда пользуются трапецеидальным законом распределения при добавлении систематической погрешности, обусловленной ее дополнительным источником.

Однако при проведении обычных лабораторных измерений часто пользуются совсем упрощенным способом оценки суммарной погрешности многократных измерений – обычным арифметическим суммированием, всегда обеспечивающим "*оценку сверху*".

Суммирование составляющих погрешности при косвенных измерениях

При выполнении косвенных измерений аргументами функции являются результаты прямых (или других косвенных измерений) со своими измеренными значениями и погрешностями.

Пусть требуется получить результат измерений величины $\left(Y \pm \tilde{\Delta}_Y\right)$, связанной с результатами измерений других величин $(\bar{X}_1 \pm \tilde{\Delta}_{X1})$;…;$\left(\bar{X}_i \pm \tilde{\Delta}_{Xi}\right)$; … $(\bar{X}_k \pm \tilde{\Delta}_{Xk})$, где погрешности представлены с доверительной вероятностью 0,99 или 1, некоторой зависимостью, называемой "*моделью измерений*" [35]:

$$Y = f(X_1, \dots, X_i, \dots, X_k). \tag{18}$$

Необходимо найти отдельно $\bar{Y} = f(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_i, \dots, \bar{X}_k)$ и отдельно $\left(\pm\tilde{\Delta}_Y\right)$, чтобы объединить их в один результат измерений.

Оценку погрешности косвенного измерения найдем по формуле

$$\tilde{\Delta}_Y = \sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\partial f(X_1;\dots;X_i;\dots;X_k)}{\partial X_i} \cdot \tilde{\Delta}_{Xi}\right). \tag{19}$$

Наиболее простым способом объединения погрешностей косвенных измерений с использованием функций, в которых аргументы суммируются или перемножаются или делятся, является следующий способ.

Пусть необходимо найти погрешность Δ_Z измеренной величины Z, определяемой через результаты измеренных прямыми методами величин $\bar{X} \pm \tilde{\Delta}_X$ и $\bar{Y} \pm \tilde{\Delta}_Y$, где погрешности представлены с доверительной вероятностью 0,997 или 1, как следующие функции:

$$Z = X + Y;\ Z = X \cdot Y;\ \ Z = X/Y.$$

Тогда погрешность косвенных измерений $\tilde{\Delta}_Z$ для этих трех функций определяется по одной и той же формуле:

$$\tilde{\Delta}_Z = \pm\bar{Z} \cdot \left(\frac{\tilde{\Delta}_X}{\bar{X}} + \frac{\tilde{\Delta}_Y}{\bar{Y}}\right). \tag{20}$$

Если аргументов в (19) более двух, в формулу (20) добавятся соответствующие слагаемые для новых составляющих погрешности, умноженные на соответствующий показатель степени. Каждое слагаемое возводится в квадрат. После чего из найденной суммы квадратов извлекается квадратный корень. Полученное число умножается на 1,73 и полученное значение принимается за погрешность косвенного измерения при вероятности 1.

Например, измеряемая величина $Z = X^m \cdot Y^n \cdot Q^k$. С учетом погрешности можно записать:

$$Z \pm \Delta_z = (X \pm \Delta_X)^m \cdot (Y \pm \Delta_Y)^n \cdot (Q \pm \Delta_Q)^k.$$

Тогда абсолютная погрешность косвенных измерений Δ_Z для этих функций определяется при доверительной вероятности 1 по формуле

$$\Delta_Z = \pm 3 \cdot Z \cdot \sqrt{\frac{1}{3}\left(\left(m \cdot \frac{\Delta_X}{X}\right)^2 + \left(n \cdot \frac{\Delta_Y}{Y}\right)^2 + \left(k \cdot \frac{\Delta_Q}{Q}\right)^2\right)}.$$

Для более сложных функциональных зависимостей целесообразно выполнить математическое моделирование косвенных измерений, чтобы убедиться в обоснованности полученной оценки погрешности. Для этого необходимо получить разброс измеренных значений косвенно измеряемой величины с перебором хотя бы крайних значений интервала для истинных значений каждого аргумента. Ширина данного разброса является оценкой погрешности косвенного измерения. Обычно такой интервал слишком завышен, так как вероятность того, что истинное значение измеренных аргументов окажется одновременно в крайних положениях соответствующего доверительного интервала, чрезвычайно мала. Поэтому доверительная вероятность для оценок погрешности косвенного измерения по формулам (19) и (20) приближается к 1, даже если доверительная вероятность для оценок погрешности аргументов была принята 0,95 и выше.

Доверительная вероятность служит показателем достоверности измерений.

2.9 Представление погрешности в результате измерений. Правила округления

Рекомендации по формам представления результатов измерений даны в МИ 1317-2004 и в правилах ПМГ 96-2009.

Поскольку измеренное значение (показание прибора) это всегда случайная величина, то результат измерений должен быть представлен *всей совокупностью возможных значений измеряемой величины*. Поэтому полная информация об измеряемой величине может быть представлена только интервалом на числовой оси с указанием функции распределения плотности вероятности.

При представлении результата воспроизведения единицы величины первичным государственным эталоном принято разделять оценки погрешности на систематические и случайные составляющие (например, оценка СКО случайной погрешности, систематическая погрешность при заданной доверительной вероятности и стабильность за установленный интервал времени). Такой же подход целесообразно использовать при представлении сведений о любых эталонах единиц величин разных разрядов. В особо ответственных случаях (при установлении физических констант, при определении постоянных коэффициентов (функций) влияния, при дальнейшем использовании результатов измерений в других измерениях) также целесообразно указывать и систематические и случайные погрешности.

Правила округления

При представлении результата измерений должно быть разумное сочетание значащих цифр в измеренном значении величины и в погрешности измерений.

Нормированную допускаемую погрешность (вероятность всегда 1) выражают числом, содержащим одну значащую цифру, если она от 3 до 8, или двумя значащими цифрами, первая из которых 1 или 2. Использование одной цифры 9 не рекомендуется (округляют до 10).

Оцененную погрешность при любой выбранной вероятности выражают числом, содержащим одну значащую цифру, если она после округления от 5 до 9, или двумя значащими цифрами, первая из которых от 1 до 4. Значение погрешности округляют в большую сторону (увеличивают на 1), если отбрасываемая цифра равна или более 5, и

оставляют без изменения, если она менее 5. Для высокоточных измерений погрешность выражают двумя любыми значащими цифрами.

Округление погрешности производится лишь при представлении окончательного результата. Все предварительные вычисления производят с тремя излишними значащими цифрами.

Измеренное значение округляют до той же цифры, которой заканчивается округленное значение оцененной абсолютной погрешности или значение допускаемой погрешности. Излишние цифры в целых числах заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают.

3 Классификация погрешностей измерений

При рассмотрении классификации погрешностей будем помнить их вероятностный смысл, то есть перед числовым значением любых составляющих погрешности всегда должен быть символ "±".

3.1 Систематические и случайные погрешности

По характеру проявления при многократных измерениях одной и той же неизменной величины погрешности делятся на ***систематические*** ($\pm\Delta_с$) и ***случайные*** ($\pm\Delta_{сл}$) составляющие (рисунок 11).

Рисунок 11 - Составляющие погрешности измерений

Ранее в отмененном ГОСТ 16263-70 им были даны следующие определения. "*Систематическая погрешность измерения* – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины". "*Случайная погрешность измерения*" - составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины".

3.2 Методические, инструментальные и субъективные

По источнику возникновения погрешности измерений подразделяются на **методические** (*м*), **инструментальные** (*и*) и **субъективные** (*суб*) – погрешности отсчета значений измеряемой величины (рисунок 12).

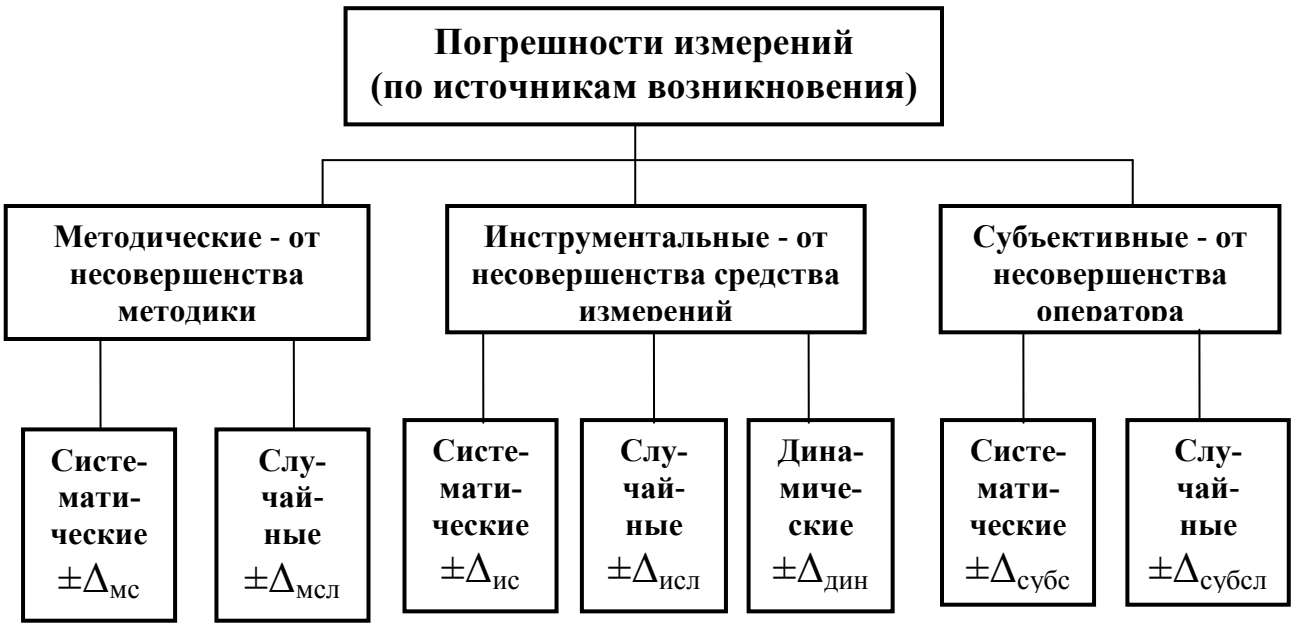


Рисунок 12 – Составляющие погрешности измерений

Инструментальные составляющие погрешности, обусловленные несовершенством СИ, в измерительном процессе присутствуют всегда. Методические и субъективные составляющие погрешности измерений иногда могут быть несущественными или отсутствовать.

Под методической составляющей погрешности измерений понимают погрешность, возникающую в измерительном процессе при условии применения "идеальных" средств измерений "идеальным" оператором, то есть, когда инструментальные и субъективные погрешности принимаются равными нулю.

Каждая из трех составляющих погрешности может быть обусловлена систематическими и случайными эффектами. В итоге полученные составляющие погрешности можно представить в виде следующей суммы:

$$\Delta_{сум} = (\Delta_{мс} + \Delta_{ис} + \Delta_{субс} + \Delta_{мсл} + \Delta_{исл} + \Delta_{субсл} + \Delta_{дин}). \qquad (21)$$

Следует заметить, что формула (21) показывает разделение погрешности на условные составляющие измерений и не является единственной формулой для вычисления оценки общей (суммарной) погрешности измерений.

При ГИС эти погрешности проявляются даже при условии применения "идеальной" геофизической аппаратуры. Например, в простейшем случае при расположении инклинометра в каверне или же-

лобе его ось не параллельна оси скважины (согласно принятой МИ эти оси должны быть параллельными). Возникает методическая погрешность, не зависящая от метрологических свойств инклинометра.

Неоднородность среды является одним из источников методической погрешности скважинных измерений параметров пластов и скважин. Они возникают, например, в результате отличия реальной структуры среды от принятой типовой модели структуры среды или несоответствия расположения зонда, принятого в МИ, реальному его расположению.

Методические погрешности носят, как правило, систематический характер. Обычно их оценивают на этапе построения и метрологической аттестации МИ, с целью установления ограничений применимости этой методики измерений конкретного параметра с нормированными пределами погрешности измерений.

Неоднородность среды также порождает необходимость введения, анализа и контроля новых метрологических характеристик скважинной аппаратуры, отражающих глубинность и разрешающую способность зондов. Эти характеристики также необходимы при установлении ограничений применимости МИ.

3.3 Оцененные и нормированные погрешности в статическом и динамическом режиме в абсолютной и относительной форме

Оцененными называются погрешности, полученные расчетным путем при вероятности менее 1.

Нормированные погрешности – это допускаемые погрешности, приписанные средству измерений или МИ при вероятности 1 и указанные в паспорте на прибор или в аттестате МВИ.

Обычно погрешности нормируют и оценивают в условиях с*татического режима* измерений, когда измеряемая величина может медленно изменяться, не вызывая запаздывания показаний прибора.

Динамические погрешности средства измерений ($\pm\Delta_{дин}$) возникают тогда, когда проявляются инерционные свойства средств измерений, то есть когда выходной сигнал не успевает отслеживать изменения измеряемой величины. При высокой скорости каротажа в тонких пластах, пересеченных скважиной, могут возникать динамические погрешности измерений. Например, в ядерно-геофизической аппаратуре с частотным импульсным выходом с целью уменьшения ди-

намических погрешностей измерений скорость каротажа ограничена до 400 м/ч. Для скважинных термометров предусмотрен контроль "*постоянной времени*".

Погрешности измерений могут быть представлены в *абсолютной* (±Δ) и в *относительной* (±δ) форме. Абсолютная погрешность представляется в единицах физической величины (например, в килограммах, метрах, секундах) и отображается символом Δ. Относительные погрешности выражаются в долях единицы или в процентах и отображаются символом δ.

Относительную погрешность вычисляют по формулам:

$$\delta = \pm\Delta/B_{\text{изм}} \quad \text{– в долях единицы;}$$

$$\delta = \pm\Delta/B_{\text{изм}}\cdot 100\% \quad \text{– процентах,} \qquad (22)$$

где Δ – абсолютная погрешность измерений; $B_{изм}$ – измеренное значение величины (при поверке и калибровке вместо измеренного значения величины используется эталонное значение величины).

Разновидностью относительной погрешности измерений является *приведенная* погрешность ±γ, то есть погрешность, приведенная к нормирующему значению (обычно к верхнему значению нормированного диапазона измерений).

Приведенную погрешность вычисляют по формулам:

$$\gamma = \pm\Delta/B_{\text{в}} \quad \text{– в долях единицы;}$$

$$\gamma = \pm\Delta/B_{\text{в}}\cdot 100\% \quad \text{– процентах,} \qquad (23)$$

где $B_в$ – верхнее значение диапазона измерений или другое нормирующее значение измеряемого параметра.

Нормирование приведенной погрешности в практике геофизических измерений не принято.

Нормированные погрешности могут быть представлены в виде функциональной зависимости абсолютной или относительной погрешности от измеряемой величины:

$$\Delta_{ор} = \pm(a + b\cdot B_{изм}); \qquad (24)$$

$$\delta_{ор} = \pm[c + d\cdot(\frac{B_в}{B_{изм}} - 1)], \qquad (25)$$

где a , b, c и d – числовые константы.

4 Поправки к показаниям и их погрешности

4.1 Истинное значение поправки и ее модели

В реальном завершенном измерительном процессе погрешность свидетельствует только о возможном рассеянии измеренных значений, которые можно было бы приписывать измеряемой величине.

Оценить некоторые составляющие *систематической погрешности* можно только в результате *метрологической деятельности* путем физического моделирования измерительного процесса с использованием *эталонов*, установок, воспроизводящих рабочие условия измерений, или математическим моделированием и только путем вычислений. Такое вычисленное при моделировании отклонение показаний от какого-либо опорного значения называется ***поправкой к показанию*** (измеренному значению) или просто ***поправкой***. Опорным значением, например, могут служить следующие: эталонное значение в нормальных условиях; показание СИ в нормальных условиях при оценивании влияния величины, значение по референтной МИ.

На рисунке 13 изображена числовая ось измеряемой величины *B*, на которой показано измеренное значение и опорное значение измеряемой величины, оценка суммарной аддитивной поправки и ее погрешность.

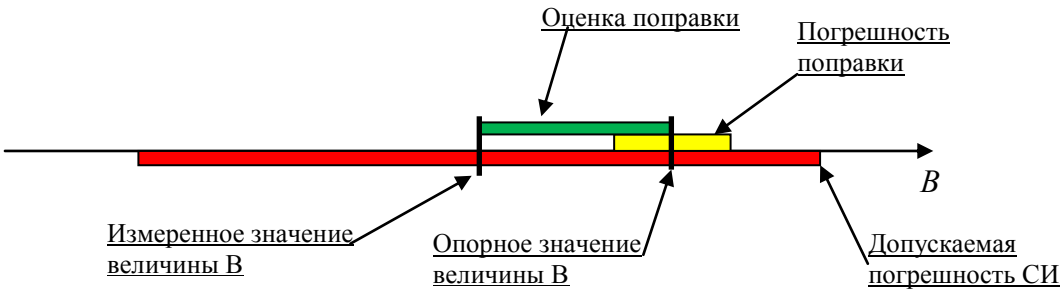


Рисунок 13 – Графическое отображение поправки и ее погрешности на числовой оси в рабочих условиях

Суммарная аддитивная поправка равна сумме всех оцененных аддитивных поправок в нормальных и рабочих условиях. Суммарная мультипликативная поправка равна произведению всех оцененных мультипликативных поправок в нормальных и рабочих условиях.

Поправка к показаниям прибора является метрологической характеристикой, но не является погрешностью измерений в вероятностном смысле. При физическом моделировании измерений, например, в результате калибровки СИ, ее значение всегда определено ***с погрешностью*** и она сама ***является случайной величиной***.

Процесс моделирования измерений отличается от реального измерительного процесса тем, что моделируется измерение величины, значение которой заведомо известно с высокой точностью. При математическом моделировании оно задается "точно", а при физическом моделировании обязательно используется эталон, допускаемая погрешность которого меньше допускаемой погрешности рабочего СИ.

Истинное значение поправки как "*разность между истинным и измеренным значением величины*" определить невозможно. Его рассматривают как абстрактный параметр математической модели измерительного процесса. *Напомним, что такое значение ранее принималось за погрешность измерений* "по определению", но только с обратным знаком. Некоторые специалисты иногда пользуются этим определением и фактически <u>истинное значение поправки ошибочно до сих пор принимают за погрешность измерений</u>.

Как уже упоминалось, коррекцию показаний СИ выполняют на основе двух типов поправок, определяемых по формулам (3) и (4).

Аддитивная поправка – это разность между значением величины, воспроизведенным эталоном, и показанием прибора, хранящего ранее переданную единицу, или разность между показанием прибора в нормальных условиях, и его показанием при измерении той же величины в рабочих условиях.

Аддитивная поправка θ к измеренным значениям параметров, отражающих состав и свойства веществ и материалов, измеренных по методикам, на которые распространяется стандарт ГОСТ Р ИСО 5725-2002, при аттестации МИ определяется как разность между опорным $B_{оп}$ (полученным по референтной МИ) и измеренным значениями величины по формуле

$$\theta = B_{оп} - B_{изм}. \qquad (26)$$

Опорным может быть значение, базирующееся на научных принципах, аттестованное (эталонное, приписанное, экспериментальное) значение, расчетно-экспериментальное значение и даже среднее

арифметическое значение (в отсутствие эталона). Опорное эталонное значение обычно воспроизводится стандартным образцом состава и свойства вещества (материала).

Поправка всегда имеет конкретный знак *плюс* или *минус*. Она добавляется к измеренному значению величины со своим знаком. Если усилия на определение поправки уже затрачены, то имеет смысл использовать её для коррекции показаний прибора с целью повышения показателей точности при представлении результата выполненных измерений.

Математическая трактовка поправок к показаниям и погрешностей измерений основана на теории вероятностей, теории множеств и математической статистике в предположении, что измерения могут быть повторены сколь угодно много раз. Моделирование погрешности возможно только в том случае, если предположить, что истинное значение поправки к каждому измеренному значению величины в любой момент времени известно.

Обычно поправки к показаниям СИ оцениваются и вводятся отдельно по каждой существенно влияющей величине. Реже оценивают одновременное воздействие двух и более влияющих величин.

В самом общем случае модель поправки описывает *поведение истинного значения поправки к измеренному значению величины во времени* и может быть представлена в виде функции времени $\theta(t)$. Ее рассматривают как случайный процесс и представляют в виде суммы трех составляющих, каждая из которых может быть обусловлена действием нескольких различных источников погрешностей [9]:

$$\theta(t) = \theta_s(t) + \dot{\theta} + \dot{\theta}(t). \qquad (27)$$

Систематическая составляющая $\theta_s(t)$ представляет собой нестационарную случайную функцию постоянной или инфранизкочастотной поправки. Систематический сдвиг измеренного значения относительно истинного как бы изменяется ("плавает") во времени. Периоды изменения составляющих систематической поправки значительно больше времени, необходимого для проведения измерения, поэтому такую поправку условно принимают постоянной.

Составляющая $\dot{\theta}$ является центрированной случайной величиной, не зависящей от времени, но изменяющейся от измерения к измерению. Случайная составляющая $\dot{\theta}(t)$ имеет широкий частотный

спектр. Периоды изменения этой составляющей поправки меньше или сравнимы со временем измерения. Она может быть разделена на две составляющие, которые являются стационарными случайными функциями времени с различными частотными спектрами, - высокочастотная и низкочастотная соответственно. Выделение составляющей погрешности $\dot{\theta}(t)$ выполняют при особо точных измерениях, как правило, при использовании первичных эталонов. В инженерных приложениях применяют частные характеристики и параметры функций распределения: корреляционную (автокорреляционную) функцию для характеристики взаимной связи между различными значениями случайного процесса или спектральную плотность случайного процесса, которая выражает среднюю мощность, приходящуюся на единицу полосы частот [9].

Эффективное использование рассмотренной модели поправки к измеренному значению величины возможно только при известном частотном спектре ее составляющих. На практике часто случайную составляющую поправки представляют в еще более упрощенном виде, а именно в виде случайной величины.

Таким образом, систематические и случайные эффекты в процессе определения поправки присутствуют всегда, и в дальнейшем будем рассматривать их независимыми от времени. В итоге рабочая модель поправки выглядит как

$$\theta = \theta_s + \dot{\theta}\,. \tag{28}$$

Истинное значение поправки к измеренному значению параметра модели объекта в реальном измерительном процессе всегда неизвестно. Именно поэтому погрешность поправки рассматривается как вероятностная характеристика. Нас интересуют только границы интервала, в котором могло бы оказаться истинное значение поправки с заданной вероятностью. Следует помнить, что модель поправки, представленная формулой (28), является сильно упрощенной (не зависимой от времени) и близка к реальности только на момент ее определения. В действительности поправка будет меняться во времени и эти изменения следует учитывать, по крайней мере, при оценке показателей неопределенности на момент выполнения измерений.

4.2 Оценка поправки в нормальных условиях

Поправку к показаниям СИ в *нормальных условиях* – ***первый тип поправки*** ($\theta_н$) к показаниям СИ, хранящего единицу, оценивают при его калибровке как разность между эталонным значением ($B_{эн}$) и показанием (измеренным значением величины - $B_{изм.н}$) по формуле

$$\theta_н = B_{эн} - B_{изм.н}. \qquad (29)$$

Если при измерении неизменной величины, воспроизводимой эталоном, наблюдается разброс показаний, то наблюдается разброс поправок и требуется вычисление среднего значения поправки.

Для получения окончательного измеренного значения величины поправку первого типа и все полученные поправки второго типа необходимо добавить к показаниям СИ со своими знаками.

Обычно поправка в нормальных условиях бывает единственной.

4.3 Оценка поправки в рабочих условиях

определяется по как разность между значением ($B_{изм.н}$), измеренным в *нормальных условиях*, и значением ($B_{изм.р}$), измеренным в *рабочих условиях*. Если при измерении неизменной величины наблюдается разброс показаний, то требуется вычисление среднего значения поправки. Обычно поправок в рабочих условиях бывает несколько в зависимости от количества влияющих величин.

Поправка к показаниям СИ в *рабочих условиях* – ***второй тип поправки*** $\theta_р$ к показаниям СИ, хранящего единицу, оценивают при его калибровке как разность между значением ($B_{изм.н}$), измеренным в *нормальных условиях*, и значением ($B_{изм.р}$), измеренным в рабочих условиях, по формуле

$$\theta_р = B_{изм.н} - B_{изм.р}. \qquad (30)$$

Если при этом также наблюдается разброс показаний СИ, то поправку вычисляют по средним значениям величины в нормальных и рабочих условиях.

Для получения окончательного измеренного значения величины поправку первого типа и все полученные поправки второго типа необходимо добавить к показаниям СИ со своими знаками.

4.4 Погрешность оцененной поправки

Поскольку измеренное значение (показания прибора) всегда случайная величина, то и *поправка* всегда является *случайной* величиной.

Словосочетание "*оценка поправки*" подчеркивает отличие оцененного значения поправки от её истинного значения. Например, истинное значение поправки может оказаться в интервале $\theta_{ист} = \tilde{\theta} \pm \Delta_э$ с вероятностью 1, если погрешности эталона $\pm\Delta_э$ нормированы пределами допускаемой абсолютной погрешности, или с вероятностью, для которой вычислена погрешность эталона.

Формулы (29) и (30) являются универсальными и почти единственными для нахождения оценки поправки к показаниям средств измерений в процессе их калибровки или поверки.

Например, в результате последнего сличения российского первичного эталона килограмма с международным эталоном, получена поправка, равная минус 0,087 мг, то есть российский эталон килограмма по массе больше ("тяжелее") международного эталона килограмма.

Еще раз подчеркнем, что *поправка к измеренному значению величины не является погрешностью, она искусственно преобразуется в погрешность со знаком "±" только при поверке СИ*, чтобы принять решение о его пригодности к дальнейшей эксплуатации без последующего использования (учета) этой оцененной поправки.

В случае необходимости повышения точности измерений полученная при поверке поправка может быть использована для коррекции показаний поверенного прибора при выполнении измерений и его погрешность какое-то время может приближаться к **погрешности введенной поправки** (к погрешности эталона).

Таким образом, предлагаемое определение поправки позволяет отказаться от деления систематической погрешности на "*исключенную составляющую*" и "*неисключенную составляющую*" и в целом существенно упрощает представления о погрешности в общей теории измерений.

5 Геофизические средства измерений

Средства геофизической измерительной техники – обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для геофизических измерений. К ним относятся: меры; измерительные приборы; измерительные преобразователи; измерительные установки; измерительные системы; измерительные принадлежности; средства сравнения; стандартные образцы и др. [1, 2, 19, 27].

Средство геофизических измерений (СГИ) – техническое средство, предназначенное для геофизических измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики (НМХ). Без НМХ СИ определение количественного значения измеряемого параметра в виде интервала для истинного значения параметра невозможно. Техническое средство тогда становится СИ, когда ему передана и в нём хранится единица величины с указанием погрешности.

По области применения и метрологического обслуживания СИ могут относиться к *сфере государственного регулирования* (здравоохранение и ветеринария, охрана труда и окружающей среды, оборона, государственный учет и контроль, геодезия, картография, метеорология) или к *сфере обычных пользователей*.

По метрологическому назначению СИ подразделяются на рабочие СИ и эталоны. СИ, предназначенные для обычных технических измерений (параметров технических устройств, технологических процессов, окружающей среды и др.), называются ***рабочими***. Вся скважинная геофизическая аппаратура относится к рабочим СИ. По условиям применения рабочие СИ могут быть лабораторными, производственными и полевыми.

СИ, предназначенные для воспроизведения и хранения единицы величины (кратных или дольных значений единицы) с целью ее передачи другим СИ, называются **эталонами**. К ним относятся эталоны единиц физических величин, все установки и устройства для калибровки и поверки скважинной аппаратуры, а также СИ, предназначенные для метрологического контроля калибровочных и поверочных установок. Эталоны делятся на первичные и рабочие. Рабочие эталоны делятся на эталоны 1, 2-го и т.д. разряда. Обычно эталоны используются в метрологической деятельности при выполнении калибровки и поверки СИ или при метрологической аттестации МИ.

5.1 Общая классификация средств измерений

Меры и стандартные образцы

Мера – средство измерений, предназначенное для *воспроизведения* и *хранения* одного или нескольких значений величины. Однозначная мера воспроизводит одно значение величины (гиря, кольцо для каверномера, один имитатор плотности горных пород, стандартный образец пористости пласта). Многозначная мера воспроизводит несколько значений величины (миллиметровая линейка с сантиметровыми штрихами, магазин сопротивлений, комплект имитаторов пористости в единой конструкции). Эталоны единиц физических величин также относятся к мерам.

Стандартный образец (reference material) – материал, достаточно однородный и стабильный в отношении определенных свойств для того, чтобы использовать его при измерении или при оценивании качественных свойств в соответствии с предполагаемым назначением. Не аттестованные СО могут использоваться для оценки прецизионности измерений, но не для калибровки СИ.

Аттестованный стандартный образец (сертифицированный СО) – стандартный образец с сопроводительной документацией, выданной авторитетным органом, в котором указано одно или более свойство с показателями точности (неопределенности) и прослеживаемостью, которые установлены с использованием обоснованных процедур [19]. Такой СО можно отнести к мерам, воспроизводящим химический состав и (или) параметр физического свойства вещества или материала с показателями неопределенности.

Коммутативность СО – свойство, характеризующееся близостью соотношения между результатами измерений определенной величины для этого образца, полученными по двум данным методикам измерений, к такому же соотношению результатов, полученных для других определенных образцов. Стабильность коммутативных СО следует регулярно контролировать.

Измерительные приборы и преобразователи

Измерительный прибор – СИ, предназначенное для извлечения измерительной информации, преобразования ее для возможного ото-

бражения в том или ином виде. Как правило, он имеет шкалу или цифровое табло, позволяющие провести отсчет измеренного значения сразу в процессе измерений. Прибор может быть показывающим или регистрирующим (самопишущим или печатающим). Например, показывающий прибор – инклинометр КИТ; регистрирующий прибор – каротажный регистратор с дисплеем или плоттером для вывода на печать кривых измеряемых параметров в виде функции от глубины скважины.

Различают приборы прямого действия (вольтметр, амперметр) и приборы сравнения (равноплечие весы, мостовые схемы). Измерительные приборы подразделяются на аналоговые и цифровые.

Измерительный преобразователь – СИ, предназначенное для преобразования измеряемой величины в другую однородную или неоднородную величину с целью представления измеряемой величины в форме, удобной при обработке, хранении, дальнейших преобразованиях, передаче в показывающее устройство. Оно не имеет устройства отображения (выходной сигнал такого преобразователя не доступен для непосредственного восприятия человеком). Это скважинные преобразователи температуры, давления, расхода жидкости (воды), каротажный регистратор с жестким диском или флэш-памятью, автономные "приборы", опускаемые в скважину на проволоке.

Первичный измерительный преобразователь часто называют "датчиком". Его часть, воспринимающая измеряемую величину, называется "чувствительным элементом" или "сенсором". *Не следует "сенсор" называть датчиком*. После датчика обычно располагается промежуточный измерительный преобразователь (аналоговый, аналого-цифровой – АЦП, цифро-аналоговый – ЦАП).

Неопределенность измерений нуля связывается с нулевым показанием или показанием, близким к нулю, и охватывает интервал, для которого неизвестно, является ли измеряемая величина слишком малой, чтобы быть обнаруженной, или показание средства измерений вызвано только шумом.

Измерительные установки и системы

Измерительная установка – "*совокупность функционально объединенных и расположенных в одном месте мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для определения одной или нескольких величин*" [19].

Установку, применяемую для поверки СИ, называют "*поверочной установкой*". Измерительную установку, входящую в состав эталона, называют "*эталонной установкой*".

Установки бывают автоматические и автоматизированные, а также – измерительно-вычислительные комплексы (ИВК). Например, установка УАК-БКЗ-БК для автоматизированной калибровки аппаратуры электрического каротажа, установка УАК-СТМ-100/60 для автоматизированной калибровки скважинных термометров и манометров.

Геофизическая измерительная система (ИС) – совокупность средств геофизических измерений, разнесенных в пространстве на значительные расстояния и соединенных каналами связи (например, геофизическим кабелем). Различают автоматизированные измерительные системы (АИС) и информационно-измерительные системы (ИИС). Вся скважинная геофизическая измерительная аппаратура, состоящая из скважинной и наземной частей, соединенных геофизическим кабелем, относится к автоматизированным измерительным системам.

К метрологическим проблемам геофизических ИС относится проблема определения общей (суммарной) погрешности измерений из-за работы составных частей в разных условиях. Например, в скважине температура достигает +170°С, а на земной поверхности (в каротажной лаборатории) +10°С и ниже. На разные участки геофизического кабеля в скважине воздействуют разные значения температуры.

5.2 Классификация геофизических СИ

По области применения геофизические СИ делятся на аэрокосмические, наземные (полевые) и скважинные.

Скважинные СИ делятся на автономные (бескабельные) СИ и измерительные системы. Скважинная геофизическая аппаратура (СГА) относится к ИС, характерной особенностью которых является значительное расстояние между ее частями в пространстве, соединенными каналом связи (например, геофизическим кабелем, гидравлическим каналом или электромагнитным каналом). Скважинная и наземная части ИС работают в резко отличающихся условиях, а на кабель воздействуют распределенные нагрузки и температура, что

вызывает проблемы с нормированием и оцениванием погрешностей измерений в реальных условиях применения аппаратуры.

Кроме того, измерения большинства параметров пластов и скважины выполняются в динамическом режиме (в процессе каротажа), что вызывает динамические погрешности, обусловленные инерционными свойствами скважинной геофизической аппаратуры. Учитывать динамические погрешности скважинных измерений путем их коррекции практически невозможно, поэтому в "Технической инструкции по проведению геофизических работ" и во всех МИ предусмотрены ограничения скорости перемещения зонда вдоль оси скважины. При этом максимально допустимую скорость каротажа выбирают таким образом, чтобы максимальные динамические погрешности не превышали половины нормировано допускаемой основной погрешности.

В аппаратуре ядерно-геофизических методов каротажа, содержащей источник ионизирующих излучений, используются два однотипных детектора (счетчика элементарных частиц) на разных расстояниях от источника. Такое конструктивное исполнение позволяет в качестве выходного сигнала аппаратуры использовать относительный выходной сигнал – отношение частоты следования импульсов в ближнем детекторе к частоте следования импульсов, зарегистрированной в дальнем детекторе.

Использование относительного выходного сигнала двухзондовой скважинной аппаратуры позволяет автоматически компенсировать значительную часть влияния какой-либо промежуточной зоны неоднородной среды. Например, он используется в аппаратуре нейтронного каротажа и плотностного гамма-гамма каротажа, что позволяет значительно снизить влияние глинистой корки и других факторов на погрешность измерений коэффициента пористости и плотности пласта, пересеченного скважиной.

5.3 Калибровка геофизических СИ и контроль их стабильности во времени

СИ могут иметь либо шкалу, либо цифровое табло, либо калибровочную функцию (ранее она называлась «*градуировочная характеристика*») – КФ, либо семейство КФ при различных влияющих факторах, либо калибровочно-поправочную функцию (КПФ).

Градуировка средства измерений – часть совокупности операций калибровки, выполняемых с целью передачи ему единицы величины путем нанесения отметок шкалы или установления параметров КФ заданного вида (понятие «*градуировка*» в законе № 102 не упоминается). КФ может быть номинальной (стандартной, типовой) или индивидуальной. Регламентируют типовую или индивидуальную КФ или индивидуальную КПФ скважинной аппаратуры.

Однако в процессе жизненного цикла СИ происходит их износ, старение электронных компонентов, изменения от периодического воздействия температуры, давления и других факторов. При этом меняется значение ранее переданной единицы физической величины. Контроль стабильности переданной единицы во времени выполняют путем периодической *поверки* с использованием эталонов и измерительных установок, воспроизводящих воздействие на СИ влияющих величин. Для индивидуально градуируемых СИ периодически строится новая КФ (КФ прежнего вида, но с новыми значениями коэффициентов).

Калибровка (средства измерений) – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений, и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона, с целью определения метрологических характеристик (МХ) этого средства измерений. В процессе метрологических исследований СИ оцениваются действительные значения его МХ (например, поправки, параметры функции преобразования, характеристики основной и дополнительной погрешности, входные и выходные импедансы, динамические характеристики). При этом не требуется подтверждение их соответствия нормированным МХ.

Поверка (средства измерений) – установление официально уполномоченным органом пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых МХ и подтверждения их соответствия обязательным установленным требованиям.

Учитывая то, что градуировка – составная часть калибровки, а калибровка – часть поверки, то графически такую иерархию понятий по содержанию можно изобразить в виде вложенных структур ("русской матрешки"), рисунок 14.

Рисунок 14 - Графическое отображение соотношения понятий "*поверка*", "*калибровка*" и "*градуировка*" СИ по их содержанию.

Процедуры калибровка и поверка основаны на измерительном эксперименте (на моделировании измерений) с использованием эталонов и измерительных установок. Без эталонов и установок эти процедуры невозможны. Что касается эталонов, то их поверка периодически выполняется после первичной калибровки.

Если осталось **прежнее** воспроизводимое значение величины эталона или прежние коэффициенты КФ или КПФ аппаратуры, то это ***поверка***. Если принято **новое** воспроизводимое значение величины эталона или новые коэффициенты КФ или КПФ аппаратуры, то эту процедуру следует называть «***калибровка***».

Следует также отметить, что поверка возможна и без результатов калибровки как допусковый контроль.

Нормальные условия – условия измерений, предписанные для оценивания характеристик средства измерений или измерительной системы или для сравнения результатов измерений.

Нормальные условия измерений характеризуются нормальной областью значений влияющих величин и устанавливаются в нормативных документах на СИ конкретного типа или при их калибровке и поверке.

Погрешность СИ в нормальных условиях называют основной погрешностью средства измерений. Нормальные условия относятся к условиям измерений, при которых установленная инструментальная погрешность будет наименьшей.

В связи с тем, что в Законе № 102-ФЗ термин «градуировка» не упоминается, то он автоматически включается в более общий термин «калибровка» и самостоятельно используется редко.

Термины "***эталонировка***" и "***тарировка***" аппаратуры, укоренившиеся в геофизике, применять не рекомендуется как не предусмотренные Законом № 102-ФЗ и не принятые для применения в общей метрологии и метрологической практике.

5.4 Нормируемые метрологические характеристики геофизических средств измерений

Инструментальной погрешностью измерений называется составляющая погрешности измерений, обусловленная неидеальностью (несовершенством) применяемых средств измерений.

К источникам инструментальной погрешности геофизических СИ относятся следующие факторы:

1) неидеальность эталона единицы величины при её передаче СИ (неверно нанесены отметки шкалы или построена КФ) в нормальных условиях;

2) отличие реальной КФ от номинальной или аппроксимированной индивидуальной КФ; например, нелинейность реальной КФ, принимаемой за линейную КФ;

3) нестабильность показаний СИ во времени;

4) наличие люфтов, гистерезиса (вариации показаний);

5) реакция (изменение показаний) СИ на воздействие влияющих факторов (температуры, давления, содержания химических элементов, диаметра скважины и пр.).

Погрешность передачи единицы величины от эталона в большинстве случаев является преобладающей и может быть уменьшена только применением более точных эталонов.

Погрешности от остальных источников могут быть уменьшены до уровня несущественных совершенствованием конструктивных особенностей самого СИ, повышением его стабильности во времени, коррекцией изменения показаний от влияющих величин.

Все свойства СИ, связанные с источниками погрешности, отражаются в документации нормированными метрологическими характеристиками (НМХ).

Оценки инструментальной погрешности измерений в реальных условиях применения СИ могут быть определены экспериментально или получены расчетным путем по его нормированным МХ.

Группы нормируемых МХ. Научно обоснованные подходы к нормированию метрологических характеристик средств измерений изложены в ГОСТ 8.009-84 "ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений". В этом стандарте выделены следующие группы характеристик: *характеристики преобразования; динамические характеристики, входные и выходные импедансы; не-*

информативные параметры выходного сигнала; характеристики погрешности; характеристики влияния.

Характеристики преобразования нормируют с целью получения возможности хранения переданной от эталона единицы измеряемой величины для отсчета показаний (получения измеренных значений). К ним относятся функция преобразования (калибровочная функция), цена деления шкалы (для аналоговых приборов), выходной код и цена единицы наименьшего разряда кода (для цифровых приборов).

Динамические характеристики отражают инерционные свойства СИ и включают полные характеристики (например, передаточную функцию, амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики) и частные характеристики (например, постоянную времени).

Входные и выходные импедансы нормируют для отражения воздействия СИ на измеряемую величину или на другое СИ. Например, расходомер в трубе создает сопротивление жидкостному потоку и изменяет значение измеряемой величины - расхода жидкости.

Неинформативные параметры выходного сигнала (например, амплитуду и форму импульса) нормируют, если они могут влиять на измеренное значение или характеристики погрешности.

Рассмотрим более детально только нормируемые характеристики основной погрешности и характеристики влияния (характеристики дополнительной погрешности).

Характеристики основной погрешности

Характеристики основной погрешности устанавливаются для определенных нормальных условий измерений и выбираются из ряда:

1) $\Delta_{осд}$ - допускаемая основная абсолютная систематическая погрешность;
2) $\sigma_д$ - допускаемое среднее квадратическое отклонение случайной составляющей основной абсолютной погрешности;
3) $H_д$ - допускаемая вариация;
4) $\Delta_{tд}$ - наибольшие допускаемые изменения показаний за установленный интервал времени t;
5) $\Delta_{од}$ - допускаемая основная абсолютная погрешность.

Первые две характеристики нормируют, когда случайная погрешность СИ существенна и соизмерима с систематической, например, у инклинометров.

Пятая составляющая нормируется вместо первых двух, когда случайная составляющая погрешности несущественна. Это наиболее распространенный случай нормирования характеристик основной погрешности для скважинной аппаратуры.

Эти характеристики связаны между собой соотношением

$$\Delta_{од} = \pm(\Delta_{осд} + 2\ \sigma_{д}). \qquad (31)$$

Третья характеристика отражает, например, люфты каверномеров и гистерезис манометров. Четвертая характеристика отражает существенное изменение погрешности во времени и нормируется, например, для скважинных высокочувствительных термометров.

Рассмотренные характеристики основной погрешности регламентируют для некоторых фиксированных условий, условно принятых за *нормальные условия* измерений. При этом нормальные значения регламентируются для каждого из влияющих факторов сравнительно узким интервалом. Например, температура окружающего воздуха (20 ±2)^{o}С, атмосферное давление (100 ± 8) кПа.

В том случае, *когда рабочие условия отличаются от нормальных* и погрешности аппаратуры существенно изменяются в зависимости от параметров влияющих факторов, нормируют ***характеристики влияния*** (характеристики дополнительной погрешности).

Характеристики влияния. Дополнительные погрешности могут рассматриваться как изменения показаний под воздействием на СИ изменений какой-либо влияющей величины (влияющего фактора) относительно ее нормированного нормального значения.

Обычно для геофизической аппаратуры ***нормируемые характеристики дополнительной погрешности*** выбираются из ряда:

1) номинальная функция влияния фактора на поправку (номинальная *поправочная функция* – ПФ) и наибольшие допускаемые отклонения от нее;
2) граничные функции влияния фактора на показания аппаратуры;
3) наибольшие допускаемые изменения показаний в интервале изменения влияющей величины.

Номинальная поправочная функция и наибольшие допускаемые отклонения от нее – нормируются для совокупности однотипной аппаратуры, если для каждого экземпляра аппаратуры сохраняется закономерность изменения показаний или выходного сигнала

при изменении влияющего фактора. Такая характеристика, например, нормирована для индукционного резистивиметра РИС-42 и аппаратуры индукционного каротажа ИК-36. Наличие такой НМХ позволяет уменьшить общую (результирующую) погрешность аппаратуры в рабочих условиях ее применения.

По сути, такая номинальная ПФ при известном значении влияющего фактора позволяет выполнить коррекцию полученного измеренного значения величины для любого однотипного прибора.

Номинальная ПФ к показаниям СИ (влияние фактора N на поправку) может быть представлена формулой

$$\theta_{нN} = F(N - N_0), \tag{32}$$

где N_0 – нормальное значение влияющего фактора.

Наибольшие допускаемые отклонения от номинальной ПФ могут быть представлены формулой

$$\Delta_{рнN} = \pm a \cdot F(N - N_0), \tag{33}$$

где а – коэффициент, отражающий интенсивность влияния фактора на показания СИ.

Например, влияние температуры T на показания аппаратуры ИК при измерении удельной электрической проводимости σ может быть нормировано функцией

$$\theta_{нT} = 0{,}0005 \cdot (T - T_0) \cdot \sigma_{изм}. \tag{34}$$

Наибольшие допускаемые отклонения от номинальной функции влияния температуры T на поправку для аппаратуры ИК могут быть нормированы в виде

$$\Delta_{рнT} = \pm 0{,}02 \cdot \theta_{нT}. \tag{35}$$

Графически обе эти характеристики могут быть представлены в следующем виде (тонким пунктиром показаны наибольшие допускаемые отклонения от номинальной ПФ), рисунок 15:

Граничные функции (условно – верхняя и нижняя) ***влияния фактора на показания аппаратуры*** – зависимость допускаемых изменений показаний от влияющего фактора. Эта характеристика нормируется, если невозможно нормировать номинальную функцию влияния из-за отсутствия закономерности изменения поправки от влияющего фактора для разных экземпляров однотипной аппаратуры, но возможно измерение самого влияющего фактора.

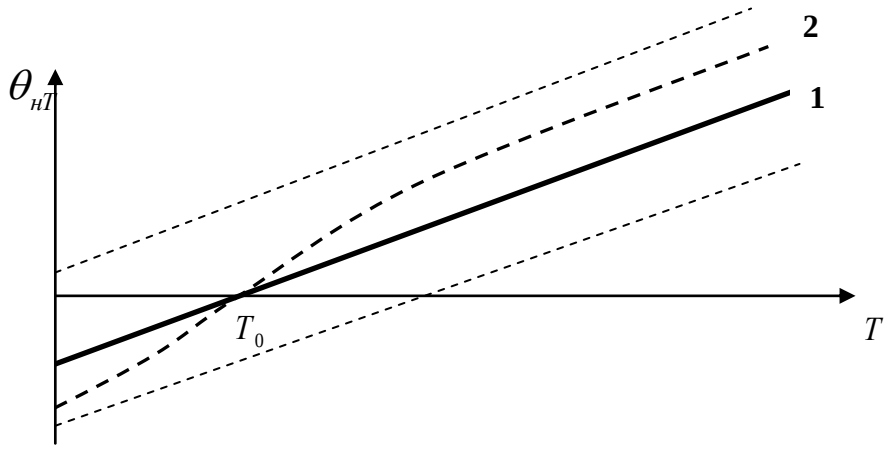


Рисунок 15 – Пример графического представления ПФ влияния величины T на показания аппаратуры: 1 – номинальная ПФ; 2 – реальная ПФ (пунктирная кривая)

Например, температура в скважине известна на любой глубине и поэтому данная характеристика нормируется для большинства типов скважинной геофизической аппаратуры и является ограничением для индивидуальных функций влияния на поправку, полученных для конкретных экземпляров аппаратуры данного типа.

На рисунке 16 обе граничные функции влияния представлены в виде пересекающихся линий, показанных пунктиром.

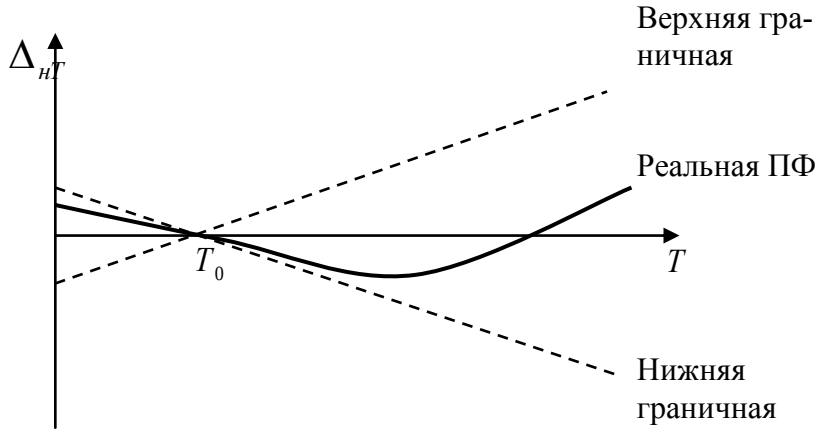


Рисунок 16 – Пример графического представления граничных функций влияния фактора T на показания аппаратуры

Экспериментально построенная реальная функция влияния температуры T не выходит за пределы пунктирных линий. Это означает, что по результатам контроля температурной погрешности аппаратуры следует сделать вывод о её годности.

По своему проявлению такая составляющая погрешности для совокупности однотипной аппаратуры носит случайный характер.

При нормировании граничной функции влияния погрешность не может быть исключена из измеренного значения параметра, если не определена реальная ПФ.

Обе граничные функции влияния чаще всего бывают симметричными относительно оси абсцисс и в аналитическом виде могут быть представлены формулой

$$\Delta_{pN} = \pm F(N - N_0), \tag{36}$$

где N_0 – значение влияющего фактора, соответствующее нормальным условиям измерений.

Например, влияние температуры T на абсолютную погрешность аппаратуры с фокусировкой тока при измерении удельного электрического сопротивления $\rho_{изм}$ может быть нормировано следующими границами:

$$\Delta_{дТ} = 0{,}0004 \cdot (T - T_0) \cdot \rho_{изм}\ . \tag{37}$$

Наибольшие допускаемые изменения показаний в интервале изменения влияющей величины – нормируется в тех случаях, когда не представляется возможным измерять значения влияющего фактора или само влияние вносит незначительную составляющую в общую погрешность измерений.

Эта характеристика отражает случайный характер данной составляющей погрешности для совокупности однотипной аппаратуры и нормируется практически для всех типов скважинной аппаратуры при контроле влияния изменения напряжения или тока питания.

Например, напряжение электрического тока на буровой меняется случайным образом в широких пределах (например, от 180 до 260 В), поэтому данное влияние для скважинной геофизической аппаратуры нецелесообразно нормировать номинальной или граничными функциями влияния.

Следует заметить, что даже при наличии индивидуальной ПФ влияния изменения напряжения питания на погрешность, полученной для конкретного экземпляра аппаратуры данного типа, не представляется возможным выполнить коррекцию этой погрешности из-за отсутствия информации о значении напряжения питания в момент выполнения измерений в скважине.

Обе границы наибольших допускаемых изменений показаний в интервале изменения напряжения питания чаще всего бывают симметричными и в аналитическом виде могут быть представлены одним числом, например

$$\delta_{pU} = \pm 0{,}01\% . \qquad (38)$$

Графически эти характеристики могут быть представлены двумя прямыми линиями, параллельными оси напряжений питания (рисунок 17).

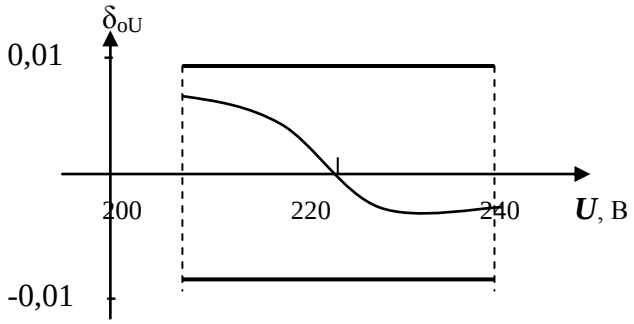


Рисунок 17 – Пример графического представления наибольших допускаемых изменений абсолютной погрешности аппаратуры в интервале изменения напряжения ***U***

Реальная ПФ пересекает ось абсцисс в точке номинального напряжения 220 В. Она на рисунке 17 изображена тонкой кривой линией. Она не пересекается с нормированными пределами, что свидетельствует подтверждение соответствия аппаратуры установленным требованиям, регламентирующим реакцию скважинной аппаратуры на изменение напряжения питания на буровой.

Классы точности

Иногда для средств измерений устанавливают класс точности, который отражает его суммарную погрешность в нормальных (иногда также и в рабочих) условиях применения и гарантирует ее с вероятностью 1.

Класс точности – обобщенная характеристика данного типа средств измерений, отражающая их уровень точности и выражаемая точностными характеристиками средств измерений. Класс точности обычно обозначается числом или символом, принятым по соглашению.

Для установления классов точности применяются общие правила, изложенные в ГОСТ 8.401-80 "Классы точности средств измерений. Общие требования". Класс точности прибора выражается в основном пределами допускаемой основной приведенной или относительной (реже абсолютной) погрешности.

Если погрешность прибора носит аддитивный характер (не зависит от измеренного значения), то класс точности выражается в форме приведенной (или абсолютной) погрешности. Для мультипликативного характера погрешности используется двухзвенная форма относительной погрешности.

Обычно класс точности выражается одним числом (например, 0,5 или 2), которое означает ***погрешность*** в процентах, приведенную к верхнему пределу $B_в$. Это максимально возможная погрешность, которая может возникнуть при правильном применении СИ в самом худшем случае. Ее значение в абсолютных единицах по классу точности (γ в %) приходится вычислять по формуле

$$\Delta B_{\max} = \pm 0{,}01 \cdot \gamma \cdot B_в . \qquad (39)$$

Иногда класс точности выражают ***относительной погрешностью***, которая на приборе обозначается цифрой в окружности, или формулой (25), а точнее ее коэффициентами c и d. Например, обозначение класса "2/0,01" означает $c = 2\%$ и $d = 0{,}01$.

Чтобы вычислить значение погрешности в абсолютных величинах, необходимо подставить показания ($B_{изм}$) прибора в формулу (25), вычислить относительную погрешность в процентах, разделить на 100 % и умножить на показания $B_{изм}$.

Класс точности в форме допускаемой основной *абсолютной погрешности* на приборе обозначается символом "М".

6 Методики выполнения геофизических измерений

6.1 Классификация измерений

Технические и лабораторные измерения

Техническими называются измерения, выполняемые рабочими СИ по аттестованным МИ с предварительно изученной и заранее определенной (нормированной) допускаемой погрешностью. Это самые массовые измерения в человеческой деятельности. Они выполняются в технологических производственных процессах, в медицине, охране окружающей среды, при испытаниях продукции, при сертификации товаров и услуг. Так, например, в процессе сертификации скважинной геофизической аппаратуры проводят испытания на воздействие предельного гидростатического давления и предельной температуры, которые воспроизводятся в испытательной камере высокого давления и измеряются поверенными термометрами и манометрами.

Лабораторными условно называются измерения, выполняемые по МИ, в которой предусмотрено вычисление погрешности в процессе или после выполнения измерений с заданной вероятностью. Геофизические измерения по такой классификации, как ни странно, относятся к лабораторным измерениям, хотя скважинные измерения выполняются в очень сложных полевых условиях под воздействием высоких температуры и давления в неоднородных средах в динамическом режиме. Погрешности геофизических измерений почти всегда оцениваются после выполнения измерений перед представлением результата измерений.

Если лабораторные измерения выполнены в процессе метрологической деятельности (например, при калибровке или поверке) с использованием эталонов, то они иногда условно называются *метрологическими*. Это особый вид измерений заранее известной величины, выполняемых с целью анализа погрешности СИ и определения (измерения) поправок к показаниям приборов, имеющих шкалу или КФ.

Фактически метрологические измерения даже затруднительно назвать измерениями, поскольку решается обратная измерительная задача, когда исследуют отклик СИ на известное значение измеряемой величины. Поверку можно отнести к "метрологическим испытаниям", в процессе которых происходит подтверждение соответствия

СИ метрологическим требованиям. Например, периодическую поверку скважинных нейтронных влагомеров горных пород выполняют с использованием эталонов (имитаторов пористости или стандартных образцов пористости), производя ее отбраковку по метрологическим признакам с заключением "годен" или "негоден".

Прямые и косвенные скважинные измерения

По общим приемам получения измеренных значений параметров пластов и скважин скважинные измерения делятся на прямые и косвенные.

Прямыми называются измерения, при которых искомое значение величины получают непосредственно от СИ. Например, масса измеряется непосредственно с помощью весов, температура – термометром, азимут и зенит оси скважины – по соответствующим шкалам инклинометров КИТ или считываются с экрана компьютера измерительной инклинометрической системы ИОН-1 или ИММН-73. Для простых прямых измерений обычно методика измерений излагается в руководстве по эксплуатации СИ. В этом случае МИ в виде отдельного документа не требуется. Для прямых скважинных измерений требуется отдельная МИ из-за необходимости коррекции измеренного значения при воздействии большого количества влияющих факторов.

Косвенные измерения – измерения, при которых искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной.

Например, измерения *коэффициента пористости* по плотности пористой породы, измеренной аппаратурой плотностного ГГК, или *коэффициента нефтенасыщенности* продуктивного пласта по измеренным значениям УЭС пласта, параметра нефтенасыщенности и коэффициента пористости. Для косвенных измерений всегда оформляется МИ в виде отдельного документа.

Совокупные и совместные измерения

Иногда отдельно рассматривают совместные и совокупные измерения.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения

величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Например, измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) пласта путем измерений кажущихся значений УЭС градиент-зондами разной длины.

Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких разноименных величин для определения зависимости между ними.

Совместные измерения выполняют также при реализации косвенных измерений или одновременном измерении измеряемой и влияющей величины. Например, измерения плотности вещества в затрубном пространстве скважины и толщины стенки обсадной колонны скважинным гамма-плотномером-толщиномером СГДТ.

Статические и динамические измерения

По отношению к изменению измеряемой величины измерения делятся на статические и динамические. Если в процессе измерений инерционные свойства СИ не вызывают существенных динамических погрешностей, то измерения можно считать статическими. Иначе измерения считаются динамическими.

Статическое измерение – измерение величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Динамическое измерение – измерение в режиме использования средства измерений, связанном с изменениями условий (факторов) за время проведения измерительного эксперимента, которые влияют на результат измерения (оценку измеряемой величины), в том числе изменение измеряемой величины за время измерения.

Измерения в скважинах относятся к динамическим измерениям, так как измеряемый параметр на входе перемещающегося вдоль скважины зонда непрерывно меняет свои значения. Именно динамические погрешности скважинных измерений являются главной причиной ограничения скорости каротажа.

Однократные и многократные измерения

В зависимости от числа измерений одной и той же неизменной величины различают однократные и многократные измерения.

Однократными называются измерения величины, выполненные один раз. Измерения в скважинах, как правило, однократные. Для оценки сходимости показаний скважинной аппаратуры предварительно оценивают сходимость (степень разброса) или воспроизводимость ее показаний в специальных контрольных скважинах путем многократных измерений.

Многократные измерения выполняются соответственно несколько раз. При многократных измерениях предварительно получают несколько промежуточных измеренных значений, которые не могут быть одновременно представлены в результате измерений. Затем определяют среднее арифметическое значение, принимаемое за окончательное измеренное значение. Многократные измерения выполняются с целью выявления и уменьшения случайной составляющей погрешности методик измерений параметров веществ и материалов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2002.

Иногда в скважинах выполняют двукратные измерения в интервалах перекрытия для того, чтобы подтвердить качество выполненных измерений по размаху случайной составляющей погрешности геофизических измерений. Однако такие измерения нельзя назвать многократными, так как они выполняются для качественного заключения о степени сходимости измеренных значений величины в одних и тех же условиях скважинных измерений.

6.2 Методика измерений как нормативный документ

Измерения должны выполняться в соответствии с аттестованными методиками [1], на которые распространяется ГОСТ 8.563-96 "ГСИ. Методики выполнения измерений".

Следует заметить, что более 99,9% всех выполняемых в мире измерений относятся к техническим измерениям, когда погрешности измерений определены заранее допускаемой погрешностью при вероятности 1 и нет необходимости их вычислять. Часто в простейшем измерительном процессе ограничиваются однократным измерением в соответствии с руководством по применению СИ (отсутствует необходимость в статистической обработке измеренных значений), и отдельная МИ не требуется.

Документально планируемый измерительный процесс регламентируют утвержденной ***методикой измерений*** параметра модели ре-

ального объекта в реальных условиях. Ранее, до вступления в силу Закона № 102-ФЗ, она называлась "*методикой выполнения измерений*" (МВИ).

Методика измерений – ***установленная логическая последовательность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результата измерений в соответствии с принятым методом измерений*** [19].

В Законе № 102-ФЗ дана иная формулировка: "*Методика (метод) измерений – совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности*". Из этого определения видно, что законодательно закреплено требование **указывать в результате измерений показатели точности** (например, погрешность), которые нормированы или приписаны данной МИ, а также погрешности, оцененные в соответствии с данной МИ. Видно также, что "*методика измерений*" – это текстовый нормативный документ, описывающий совокупность конкретных операций.

Аттестация МИ – исследование и подтверждение соответствия МИ установленным метрологическим требованиям к измерениям.

6.3 Назначение методики измерений

В соответствии с основным уравнением измерений (формула (5)) основное назначение методики измерений заключается в описании последовательности операций, дающих возможность получить:

1) наиболее вероятное измеренное значение, приписываемое измеряемой величине;

2) обоснованные показатели неопределенности измерений, позволяющие объективно оценить качество выполненных измерений.

При выполнении многократных измерений в качестве измеренного значения обычно принимают среднее арифметическое показаний после добавления к нему всех предусмотренных поправок.

В качестве показателей неопределенности иногда целесообразно указывать обе (и систематическую и случайную) составляющие погрешности в виде СКО или доверительного интервала (например, для эталонов). В других случаях ограничиваются суммарной погрешностью в виде СКО или доверительного интервала.

Если по условиям измерений предусматривается дальнейшее сравнение результата измерений с каким-либо граничным или контрольным значением, то в МИ должна быть предусмотрена возможность вычисления доверительного интервала для очень высокой вероятности, включая 1.

Иногда показатели точности не вычисляют, а сразу в результате измерений указывают норму погрешности при вероятности 1 или приписанную погрешность при вероятности менее 1, регламентированную конкретной МИ. Рекомендуется периодически вычислять реальную погрешность измерений и сравнивать ее с нормой, чтобы быть уверенными в том, что реальная погрешность не превышает допускаемую.

6.4 Основные этапы разработки

При выполнении лабораторных измерений различают три стадии измерительного процесса: 1) постановка измерительной задачи; 2) планирование и подготовка измерений; 3) выполнение измерений - измерительный эксперимент.

В зависимости от сложности измерительного эксперимента, используемого эталона или опорного значения величины, а также степени разброса измеренных значений создаются разные МИ: 1) с представлением погрешности при незначительном разбросе измеренных значений; 2) с представлением показателей прецизионности (сходимости и воспроизводимости) при значительном разбросе измеренных значений.

Причем МИ первого типа часто являются отдельными составными частями МИ второго типа. В МИ второго типа (например, при измерениях состава и свойств веществ и материалов методами межлабораторного анализа) иногда отсутствует эталон и обработка измеренных значений выполняется преимущественно статистическими методами [3 - 8].

Основными этапами разработки МИ являются следующие:

1) назначение норм погрешности измерений;

2) обоснование модели объекта измерений и определение измеряемой величины (параметра модели);

3) выбор средства измерений; анализ источников неопределенности измерений;

4) формирование модели поправки к показаниям;

5) формирование модели погрешности измерений;

6) формирование исходных данных, необходимых для расчета погрешности измерений;

7) расчет составляющих погрешности измерений;

8) суммирование составляющих погрешности измерений;

9) сопоставление оценки погрешности с нормой погрешности измерений;

10) оформление текста стандартной МИ.

В тексте МИ дается описание модели объекта, указывается наименование измеряемого параметра модели объекта, принятого за измеряемую величину "по определению", и дается его словесное описание или приводится формула (алгоритм) для вычислений измеренного значения этого параметра модели объекта. Дается также полное описание технологии проведения экспериментальных работ, статистическая обработка измеренных значений и алгоритм вычисления погрешности выполненных измерений.

6.5 Требования к изложению методики измерений

Документ на МИ должен содержать вводную часть и следующие разделы:

1 Требования к погрешности.

2 Методы измерений.

3 Средства измерений, вспомогательные устройства.

4 Требования безопасности, охрана окружающей среды.

5 Требования к квалификации оператора.

6 Условия измерений.

7 Подготовка к измерениям.

8 Выполнение измерений".

9 Обработка показаний СИ.

10 Оценка показателей точности измерений.

11 Оформление результатов измерений.

В разделе "Погрешности измерений" должны быть указаны нормы на допускаемые погрешности или приписанные погрешности, которым должны удовлетворять результаты измерений, получаемые при соблюдении всех требований данной МИ.

Раздел "Условия измерений" должен содержать требования к объекту измерений, номинальные значения влияющих величин, допускаемые отклонения от них и способы расположения СИ относительно объекта при их измерениях.

В разделе "Выполнение измерений" описывается последовательность, периодичность и количество считываний показаний (регистрации каждого значения измеряемой величины) и измеренных значений влияющих величин.

Раздел "Обработка показаний СИ" должен содержать способы определения поправок по имеющимся функциям влияния, получения среднего значения измеряемой величины и описание последовательности введения поправок к среднему значению показаний.

Раздел "Оценка показателей точности измерений" представляет собой инструкцию по оформлению отчета об оценке показателей неопределенности измерений (*бюджет неопределенности*), включая систематические и случайные составляющие погрешности, и должен содержать способы суммирования составляющих погрешности измерений, включая погрешности введенных поправок (рисунок 18).

Рисунок 18 – Содержание описания бюджета неопределенности

В разделе "*Оформление результатов измерений*" должна быть описана форма представления результата измерений с полной информацией о показателях точности измерений, включая информацию о доверительном интервале систематической погрешности и (или) СКО случайной погрешности выполненных измерений.

6.6 Референтная методика измерений

Иногда методика измерений принимается в качестве эталонной для других методик выполнения измерений. Ее называют "***референтной методикой измерений***". Слово "*референтная*" означает "*исходная*", то есть главная и наиболее точная.

Это "***методика, принятая для получения результатов измерений, которые могут быть использованы для оценки правильности измеренных значений величины, полученных по другим методикам величины того же рода, а также для калибровки или определения характеристик стандартных образцов***".

Выделяют также "*первичную референтную методику измерений, которая используется для получения результата измерений без сравнения единицы величины того же рода*" [19].

Референтную МИ, используемую для оценки показателей неопределенности других МИ, можно рассматривать подобно эталону единицы величины в процессе поверки СИ, то есть определять поправку к измеренным значениям, полученным по аттестуемой методике и оценивать её погрешности.

Если одна и та же величина измеряется разными методами на основе разных принципов, то одна из этих методик может быть принята в качестве референтной.

Например, при измерении коэффициента пористости одного и того же водонасыщенного песчаного пласта горной породы, пересеченной скважиной, методика нейтронного каротажа может быть выбрана в качестве *референтной* для методик плотностного гамма-гамма-каротажа, акустического каротажа и электромагнитного каротажа.

6.7 Правильность и прецизионность методики

Иногда при выполнении лабораторных петрофизических измерений возникает необходимость выделения чисто случайной составляющей погрешности выполненных многократных измерений, которая может быть выражена вычисленной оценкой среднего квадратического отклонения (СКО) случайного разброса измеренных значений (показаний).

Эту составляющую иногда называют *стандартным отклонением*, являющимся точечной оценкой разброса случайной величины,

косвенно отражающего часть общей погрешности измерений - ее случайную составляющую.

СКО используется при описании случайной погрешности первичных эталонов или при измерениях на пределе чувствительности метода измерений, когда случайные погрешности преобладают над систематическими. Оценка СКО случайной погрешности при выполнении массовых технических измерений практически не используется.

Однако существует особая область массовых измерений параметров веществ и материалов методами лабораторного и межлабораторного анализа (например, методы аналитической химии), когда случайные погрешности существенно превышают систематические, например при исследовании керновых образцов горных пород.

Петрофизическая лаборатория условно рассматривается как СИ с набором методов и средств измерений. Основным документом, регламентирующим процедуры этих измерений, является методика измерений (МИ или МВИ). При таких измерениях иногда отсутствуют эталоны единиц измеряемых параметров, погрешности оцениваются преимущественно статистическими методами, а поправки определяются сравнением с каким-либо принятым опорным значением.

Основные принципы и методы таких измерений регламентированы шестью международными стандартами от ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 до ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 [3 - 8], где основными показателями точности измерений являются "***правильность***" и "***прецизионность***". Термин "*правильность*" характеризует близость измеренного среднего арифметического к принятому опорному значению, а "*прецизионность*" – как обычно, степень близости измеренных значений друг к другу. Показателем правильности (смещения) обычно является поправка, вычисляемая как разность между опорным и средним арифметическим значениями, прецизионность оценивается СКО.

Эти стандарты распространяются на методики измерений по ГОСТ 8.563-96, способы оценки правильности и прецизионности и их применение при оценке качества (при аттестации) методик измерений, на оценку компетентности петрофизических лабораторий геофизических или нефтяных компаний в соответствии с требованиями ИСО 5725 и ИСО 17025.

На разброс измеренных значений (по одной и той же стандартной методике) могут влиять: оператор; СИ и оборудование; калибровка; интервал времени между измерениями; загрязнение и влажность воздуха; температура. Возможно также различие самих исходных керновых образцов, принимаемых как идентичные.

Прецизионность является общим термином для выражения разброса измеренных значений, который в зависимости от условий измерений характеризуется "повторяемостью (сходимостью)" и "воспроизводимостью".

Сходимость – характеристика качества методики измерений, отражающая близость друг к другу (рассеяние) значений величины, многократно измеренной в условиях повторяемости: по одной и той же методике измерений; в одной лаборатории; одним оператором; одним и тем же СИ; с одинаковым интервалом.

Воспроизводимость – характеристика качества методики измерений, которая отражает рассеяние (близость друг к другу) измеренных значений величины в разных условиях (в различных лабораториях, разными средствами, разными людьми, в разное время).

Сходимость и *воспроизводимость* измерений часто выражают СКО. Они представляют собой два крайних случая прецизионности - минимальный и максимальный разброс измеренных значений. Очевидно, *воспроизводимость всегда больше сходимости*, так как добавляется разброс измеренных значений за счет изменения самой измеряемой величины, изменения реакции СИ на изменения влияющих факторов, различий в квалификации специалистов и других причин.

Воспроизводимость может быть использована для характеристики разброса одной и той же единицы величины, воспроизводимой разными эталонами в одной или разных странах. Воспроизводимость, например, может служить показателем разброса измеренных значений разными петрофизическими лабораториями. В геофизической практике этот показатель характеризует разброс единицы коэффициента пористости или плотности горных пород, воспроизводимой разными однотипными стандартными образцами состава и свойств горных пород, пересеченных скважиной, в разных компаниях.

В аккредитованной петрофизической лаборатории для аттестованной МИ могут быть нормированы *допускаемая сходимость и (или) допускаемая воспроизводимость*.

Относительно использования СКО разброса измеренных значений в качестве характеристики качества методики измерений можно сделать следующее замечание. Оцененное значение СКО имеет смысл только для будущего однократно измеренного значения величины. Если измерения выполнены по стандартной методике, предусматривающей, например, 10 измеренных значений, то будет найдено среднее измеренное значение и ранее оцененное СКО теряет смысл, так как будет найдено уже СКО среднего значения по 10-ти измеренным. Поэтому при представлении результата лабораторных измерений рекомендуем пользоваться преимущественно оценками погрешности при доверительной вероятности.

Таким образом, *МИ параметров с большим разбросом измеренных значений помимо получения каждого из них содержит подробное описание методики их статистической обработки*.

6.8 *Обобщенная схема выполнения прямых измерений*

Средство измерений (прибор, система), получившее единицу от эталона величины в виде шкалы или КФ в нормальных условиях измерений, взаимодействует с объектом в рабочих условиях в течение известного промежутка времени. За это время в окружающей среде могут происходить изменения величин, влияющих как на средство измерений, так и на измеряемую величину объекта измерений.

В результате калибровки прибора становятся известными поправки к его показаниям (к отметкам шкалы или к выходному сигналу) в нормальных и рабочих условиях с известными показателями точности. Поправки могут быть определены до или после выполнения измерений и разделены на существенные и несущественные в зависимости от показателей точности измерений. Несущественные поправки вместе с их погрешностью учитывают при нормировании допускаемой систематической погрешности прибора до измерений или при оценке его погрешности после измерений.

При таком взаимодействии с объектом всегда наблюдается значительное или незначительное рассеяние показаний прибора в течение планируемого времени многократных измерений в условиях повторяемости или в условиях воспроизводимости.

На рисунке 19 представлена обобщенная схема взаимосвязи элементов прямых ***n***-кратных измерений с поправкой в нормальных условиях и с ***m*** поправками в рабочих условиях.

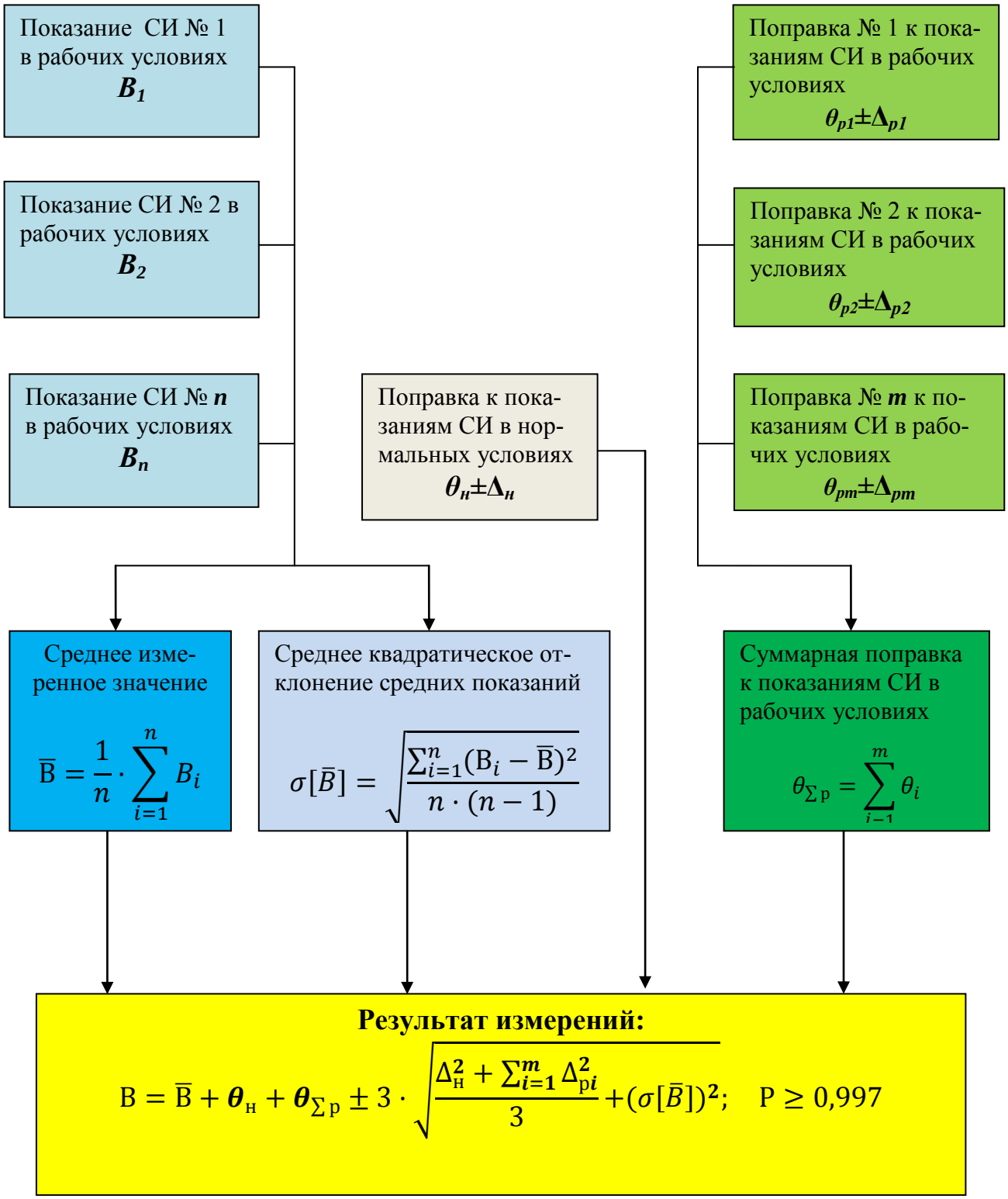


Рисунок 19 – Обобщенная схема взаимосвязи элементов прямых измерений

Если поправка к показаниям СИ в нормальных условиях не производится, то вместо погрешности этой поправки $\Delta_н$ используется нормированное значение допускаемой основной абсолютной погрешности СИ.

Если случайная погрешность выполняемых измерений существенна, но по техническим причинам можно зарегистрировать только одно показание, то при вычислении общей погрешности вместо оцененного значения СКО средних значений показаний используется заранее оцененное или нормированное допускаемое значение СКО показаний.

7 Измерения в неоднородных средах

7.1 Химические элементы, вещества и горные породы

Вселенная состоит из материи, существующей в двух формах – вещество и поле. Вещество дискретно (состоит из частиц, между которыми пустота) и обладает плотностью. Поле непрерывно, не обладает плотностью, но обладает напряженностью. Известны четыре состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное и плазма. Плазма - ионизированный газ, состоящий из заряженных частиц - ионов.

Известны четыре фундаментальных взаимодействия, наблюдаемых во Вселенной:

– сильное (удерживает ядро от распада);

– слабое (способствует распаду ядра);

– электромагнитное (радиоволны, свет, гамма-излучение);

– гравитационное (гравитационные волны притяжения масс, природа неизвестна).

Выдвинута гипотеза о существовании темной материи, не испускающей электромагнитного излучения, и темной энергии.

Фундаментальными понятиями физической реальности являются "*пространство*" и "*время*". Пространство в сознании человека отражается понятиями "*расстояние*", "*вещество*", "*поле*" и "*физический вакуум*". Физический вакуум – это нейтральная среда (не проявленная реальность), способная проявляться, порождая пары элементарных частиц и античастиц (мельчайших частиц материи): электрон - позитрон; протон - антипротон; нейтрон - антинейтрон и т.п.

Сначала был обнаружен электрон (1897, Томсон), затем протон (1913), а позднее нейтрон (1932, Чедвиг). Античастицы предсказал Поль Дирак (1928), а в 1932 г. был открыт позитрон, в 1955 – антипротон, в 1956 – антинейтрон. Из античастиц складывается антивещество, скопление которого во Вселенной пока приборами не обнаружено.

Элементарная частица – собирательный термин, относящийся к микрообъектам, которые меньше, чем ядро атома, и их нельзя расще-

пить на части. Протон и нейтрон имеют сложную внутреннюю структуру, но разделить их на части невозможно. Другие частицы (электрон, нейтрино и др.) являются бесструктурными фундаментальными частицами – лептонами и кварками (по 6 частиц каждого рода). Вместе с античастицами они составляют набор из 24 фундаментальных частиц. Бозоны являются переносчиками электромагнитного, сильного и слабого взаимодействия. Протоны и нейтроны относятся к бозонам, их называют нуклонами, они гипотетически состоят из кварков, которые в свободном состоянии пока не наблюдались. Электрон относят к лептонам. Фотон – квант света относится к бозонам и является квантом электромагнитного поля. В 2017 г. открыт Бозон Хиггса, он распадается на 2 фотона.

Вещество состоит из атомов химических элементов и молекул.

Химический элемент – это совокупность атомов с одинаковыми или близкими характеристиками. В природе встречается около 90 химических элементов, часть элементов синтезированы человеком. Физическое тело человека на 99 % состоит из шести химических элементов: *водорода H; углерода C; азота N; кислорода O; кальция Ca; фосфора P*. В земной коре содержатся практически все известные в природе химические элементы.

Свойства химических элементов подчиняются периодическому закону, открытому и сформулированному в 1869 г. Дмитрием Ивановичем Менделеевым ***"Свойства элементов, а потому и образуемых ими простых и сложных тел (веществ), стоят в периодической зависимости от их атомного веса".***

Современная трактовка этого закона:

"***Свойства химических элементов (т.е. свойства и форма образуемых ими соединений) находятся в периодической зависимости от заряда ядра атомов химических элементов***".

Периодические изменения свойств химических элементов обусловлены правильным повторением электронной конфигурации внешнего энергетического уровня (валентных электронов) их атомов с увеличением заряда ядра.

Атом – мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства. В современной физике и химии в качестве рабочей модели строения атома принята планетарная модель Резерфорда - Бо-

ра (1911). Масса атома химического элемента сконцентрирована в его положительно заряженном ядре, вокруг которого на разных орбитах вращаются легкие отрицательно заряженные электроны. Ядро состоит из равных по массе положительно заряженных протонов и незаряженных нейтронов. Масса покоя электрона в 1836 раз меньше массы покоя протона и нейтрона. Электрон распространяется как волна, но проявляет свойства отрицательно заряженной частицы. Определить одновременно и местоположение и скорость электрона невозможно (принцип неопределенности Гейзенберга, 1927 г.). Поэтому рассматривают не орбиты электрона, а вероятные места его появления, называемые орбиталью, что позволяет считать пространство вблизи ядра атома непустым.

Наименьшим по массе химическим элементом является ***водород***, состоящий из одного протона и одного электрона – единственный химический элемент, не содержащий нейтронов. Можно условно считать, что масса гелия, ядро которого содержит два протона и два нейтрона, приблизительно равна массе 4-х атомов водорода, масса углерода – 12-ти, а масса кислорода – массе 16-ти атомов водорода.

Моль – единица количества вещества, принятая в химии.

Атомы могут отдавать или присоединять электроны, становясь положительно или отрицательно заряженными ионами. Атомы образуют молекулы.

Молекула – наименьшая частица вещества, образованная из атомов, способная к самостоятельному существованию и обладающая основными химическими свойствами данного вещества.

Радиоактивные вещества (уран, радий, полоний, плутоний, цезий, америций, торий, калий) излучают альфа-частицы – ядра гелия, ветта-частицы – поток электронов и позитронов и гамма-кванты – электромагнитные волны высокой частоты. Гамма-излучение не имеет массы и заряда, но взаимодействует с электронами и не взаимодействует с ядрами. Нейтроны взаимодействуют с ядрами и не взаимодействуют с электронами.

По составу вещества делятся на чистые вещества и смеси.

Чистые вещества в пространстве по составу не меняются и делятся на простые вещества, состоящие из атомов одного вида, и сложные вещества, состоящие из атомов разного вида.

Смеси меняются в пространстве по составу и делятся на гомогенные растворы и эмульсии (на макроуровне нельзя выделить границы раздела веществ, например, водонефтяная эмульсия) и гетерогенные (на макроуровне можно выделить границы раздела разных веществ, например, отдельные капли нефти или пузыри газа в воде).

Горная порода – естественный твердый минеральный объект в земной коре определенной структуры и состава. Породы делятся на три группы – магматические, метаморфические и осадочные. Осадочные породы возникают в результате преобразования в поверхностной части земной коры осадков, представляющих собой продукты разрушения древних пород, вулканов, жизнедеятельности растений и организмов. Свойства горной породы вмещать (пористость) и пропускать (проницаемость) через себя жидкости и газы называются фильтрационно-ёмкостными свойствами (ФЕС).

Горные породы также состоят из атомов химических элементов и их соединений – молекул.

Кварц представляет собой двуокись кремния (SiO_2).

Кальцит состоит из углекислого кальция ($CaCO_3$).

Доломит – из углекислого кальция и магния ($CaMg(CO_3)_2$).

Ангидрит – из сернокислого кальция ($CaSO_4$).

Галит (каменная соль) – из хлористого натрия ($NaCl$).

Глина (каолинит) содержит алюминий, кремний, кислород и водород – $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (где SiO_2 – 46 %; Al_2O_3 – 40 % и H_2O – 14 %).

Глина (монтмориллонит) содержит натрий, кальций, алюминий, магний, кремний, кислород и водород – химическая формула $(Na,Ca)_{0,33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot n \cdot H_2O$.

В глинистых горных породах концентрируются уран, торий, калий.

Горные породы бывают плотными и пористыми. Нефть и газ содержатся в порах, кавернах и трещинах горных пород и состоят из углеводородов (пропан CH^4, этан C^2H^6, метан C^3H^8, бутан C^4H^{10}, пентан C^5H^{12} и др.). Поры также могут быть заполнены водой (пресной или минерализованной) и глинистым материалом.

Нефтяные и газовые месторождения состоят из залежей – пластов нефтегазонасыщенных горных пород, находящихся в слабопроницаемых ловушках, препятствующих перемещению нефти и газа.

Главной целью ГИС является выделение границ пластов и распознание химического состава твердой, жидкой и газообразной фазы пористого пласта, массового или объемного соотношения между ними и выявление возможности извлечения найденных полезных ископаемых веществ (нефти, газа, воды, угля, руд) из продуктивных пластов горных пород на земную поверхность.

7.2 Микро- и макронеоднородность вещества

К основным понятиям метрологии – науки об измерениях – относятся понятия «физическая величина» и «измеряемая величина» или «измеряемый параметр объекта». Если физическая величина отражает свойство вещества, то по умолчанию предполагается, что количественное содержание этого свойства в каждом элементарном объеме вещества одинаково. Теоретические основы измерений параметров состава и свойств однородных объектов (веществ) хорошо изучены и разработаны в общей метрологии.

Однако объекты геофизических измерений – пласты горных пород, пересеченные скважиной, *не являются однородными*. Скважина после спуска колонны и цементирования также становится неоднородной. Многокомпонентный поток газожидкостной смеси в колонне (вода, нефть, газ, твердые примеси) с каплями и пузырями также неоднороден.

Измерения параметров, отражающих состав и свойства пластов и скважин, относятся к области измерений в неоднородных средах и

сопряжены с большими техническими трудностями (проблемами), обусловленными необходимостью распознавания и учета структуры неоднородной среды и химического состава однородных структурных зон при их изучении. ***Теория геофизических измерений в скважинах находится в стадии формирования и разработки***.

По масштабам проявления неоднородности свойств различают микронеоднородные и макронеоднородные среды. В зависимости от направления изменений свойств в пределах исследуемой среды различают вертикальную, горизонтальную (радиальную) и азимутальную неоднородности. На границах сред значения параметров могут изменяться плавно (зона проникновения, зона водонефтяного контакта, глинистая "корка") или скачкообразно (граница "*скважина – пласт*" или границы пластов). В пределах исследуемой неоднородной среды отдельные зоны могут располагаться закономерно (глинистые прослои) или случайным образом (трещины, каверны). Кроме того, на показания ядерно-геофизической аппаратуры оказывает влияние химический состав пород (минералов) и вещества в поровом пространстве. Пористый пласт считается микронеоднородным, если поры распределены в пространстве равномерно (межзерновой тип пористости). В этом случае перемещение зонда вдоль пласта не вызывает изменений показаний скважинной аппаратуры.

Пористый пласт считается макронеоднородным, если поры распределены в пространстве неравномерно (макротрещины и каверны). В этом случае перемещение зонда вдоль оси скважины может вызвать заметные изменения показаний скважинной аппаратуры.

Перечисленные разновидности и особенности макронеоднородности в целом обусловливают выбор размеров зондов скважинной аппаратуры и схемы построения методик геофизических измерений.

Макронеоднородные среды описываются геометрическими и физическими параметрами. Геометрические параметры отражают структуру исследуемой неоднородной среды. К ним относятся линейные размеры структурных зон (толщины пластов и глинистой корки, диаметры скважины и зоны проникновения), а также парамет-

ры, характеризующие взаимное расположение отдельных структурных зон (например, углы пересечения оси скважины с границами пластов). К физическим параметрам относятся физические величины, отражающие свойства отдельных структурных зон (пласта, вмещающих пород, зоны проникновения, глинистой корки, скважины).

Измерения физических величин какой-либо структурной зоны принято выполнять для строго определенной *типовой структуры* макронеоднородной среды. Геофизические измерения в скважинах могут быть выполнены при условии, если *структура среды распознана* и она близка к типовой модели структуры среды с плоскопараллельными и коаксиально-цилиндрическими границами.

Особенностью скважинных измерений является то, что структура неоднородной среды и состав структурных зон *заранее неизвестны и уточняются* после выполнения измерений зондами различной конструкции на основе разных физических полей с использованием разных принципов и способов измерений по каротажным диаграммам и керну. Поскольку пласты горных пород пересечены скважиной, то *типовые модели структуры* такой среды представляют собой *неоднородные структуры с комбинацией плоскопараллельных и (или) коаксиально-цилиндрических границ раздела однородных сред.* Эти 2 особенности определяют сложность обоснования и создания метрологических основ измерений геофизических величин скважинными приборами. К метрологическим основам измерений относятся методические разработки и технические средства, позволяющие обоснованно вычислять погрешности выполненных скважинных измерений, поддерживать их единство и представлять результат измерений.

Процесс распознавания структуры исследуемой среды и построения ее структурной модели по каротажным диаграммам называется интерпретацией (интерпретацией каротажных диаграмм). Распознавание структуры и состава среды происходит также с использованием результатов анализа шлама, промывочной жидкости, керновых образцов, данных пробоотборников и пластоиспытателей.

Часто *погрешности* выполненных скважинных измерений могут быть оценены только после выполнения всех запланированных изме-

рений. В ряде случаев измерения параметров пластов выполнить с гарантированной точностью принципиально невозможно.

Одна часть скважинных измерений параметров пластов в одной и той же скважине может рассматриваться как технические измерения, а другая – как лабораторные.

«*Техническими*» скважинные измерения следует называть тогда, когда условия измерений в скважине совпадают с условиями калибровки и погрешности заранее (до измерений) с учетом поправок определены. При этом измеряемый параметр по определению один и тот же при калибровке и при измерениях в скважине.

Скважинные измерения следует относить к "*лабораторным*" измерениям тогда, когда условия измерений в скважине отличаются от условий калибровки и погрешности вычисляются после измерений. При этом измеряемые параметры могут принимать кажущиеся значения, если скважинные условия отличаются по структуре и составу исследуемой среды от условий калибровки аппаратуры.

7.3 Типовые структуры при выполнении скважинных измерений

Породы с плоскопараллельными границами раздела

На рисунке 20 показана схема типовой структуры горной породы с 4 плоскопараллельными границами раздела с 5 значениями измеряемой величины (без скважины).

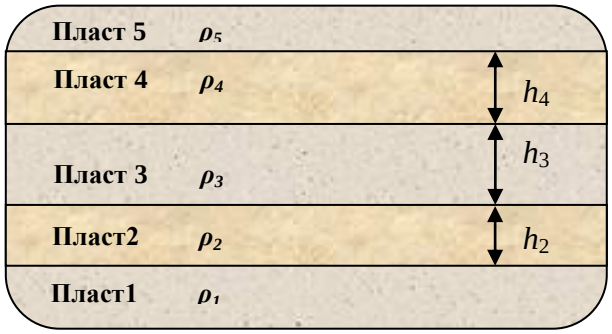


Рисунок 20 – Схема типовой структуры горной породы с 4-мя плоскопараллельными границами раздела пластов (без скважины)

Пласты 1 и 5 распространяются до бесконечности, поэтому их

толщина не указывается. Пласты 2, 3 и 4 имеют толщины h_2, h_3 и h_4.

Такая типовая структура используется редко. Она может быть использована для построения методики измерений УЭС при условии применения длинных зондов, для которых влиянием скважины малого диаметра можно пренебречь.

Погрешности выполненных скважинных измерений могут быть оценены только после выполнения всех запланированных измерений с учетом ограничений применимости метода измерений. В ряде случаев измерения параметров пластов выполнить с требуемой точностью принципиально невозможно.

Среды с цилиндрическими границами раздела

Радиальная неоднородность может наблюдаться только в пористом пласте, пересеченном скважиной, при проникновении в него фильтрата промывочной жидкости и образовании на стенке скважины глинистой корки.

Типовая структура трехслойной среды (пористого пласта бесконечной толщины, пересеченного скважиной) с двумя коаксиально-цилиндрическими границами раздела показана на рисунке 21.

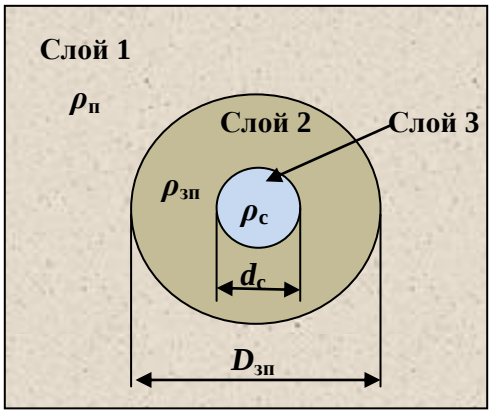


Рисунок 21 – Схема структуры трехслойной среды с двумя коаксиально-цилиндрическими границами раздела

В этой структуре известен один линейный размер – диаметр скважины $d_с$, один измеряемый параметр – диаметр зоны проникновения $d_{зп}$ (тонкая глинистая корка не показана). Известно УЭС единствен-

ной структурной зоны – скважины $\rho_с$. Неизвестными являются УЭС пласта $\rho_п$ и зоны проникновения $\rho_{зп}$., а также ее диаметр $D_{зп}$.

Такая структура была принята при создании методики БКЗ на основе совокупных измерений УЭС градиент-зондами или потенциал-зондами разной длины. В результате решения системы трех уравнений с тремя неизвестными получали измеряемые УЭС пласта и зоны проникновения и диаметр зоны проникновения.

Для технологии ВИКИЗ тоже была выбрана такая же структура или структура с тремя границами раздела.

Пористый пласт, пересеченный скважиной

Реальные пласты горных пород имеют конечную толщину – пористый пласт обычно расположен между двумя другими пластами.

На рисунке 22 показана типовая схема структуры среды с двумя плоскопараллельными и двумя коаксиально-цилиндрическими границами раздела (пористый пласт с цилиндрической зоной проникновения, пересеченный скважиной под прямым углом).

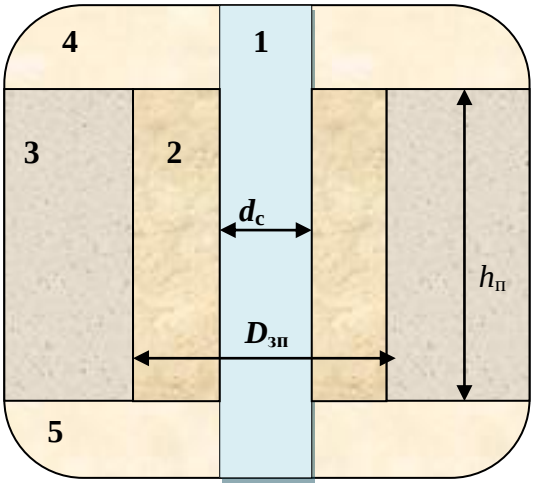


Рисунок 22 – Схема структуры среды с двумя плоскопараллельными и двумя коаксиально-цилиндрическими границами раздела в вертикальной скважине

На рисунке 23 показана типовая схема структуры среды с двумя плоскопараллельными и двумя коаксиально-цилиндрическими границами раздела (пористый пласт с цилиндрической зоной проникновения, пересеченный горизонтальной скважиной, пробуренной вдоль пласта параллельно его границам).

Такая типовая структура принята при геонавигации бурения скважины вдоль продуктивного пласта, а также при выполнении скважинных измерений параметров непосредствен в процессе бурения горизонтальной части скважины.

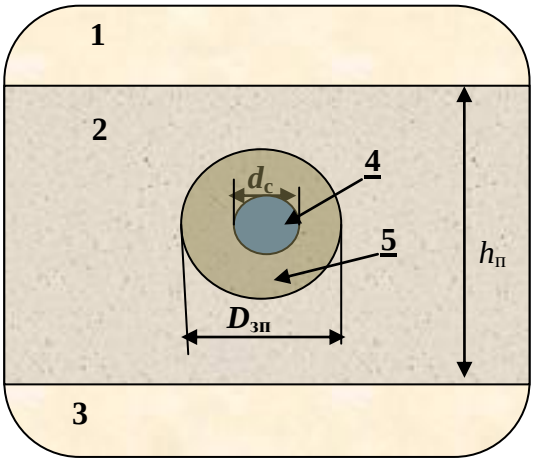


Рисунок 23 – Схема типовой структуры среды с двумя плоскопараллельными и двумя коаксиально-цилиндрическими границами раздела для пористого пласта с цилиндрической зоной проникновения от горизонтальной скважины, пробуренной вдоль пласта параллельно его границам

Скважина с зацементированной колонной

На рисунке 24 представлена схема структуры среды с тремя коаксиально-цилиндрическими границами раздела (пласт, пересеченный скважиной с бездефектно зацементированной колонной).

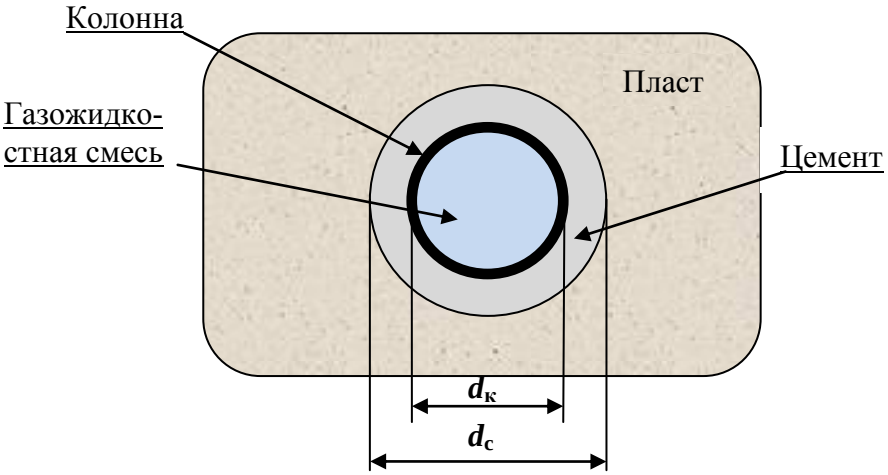


Рисунок 24 – Схема структуры среды с тремя коаксиально-цилиндрическими границами раздела

Разновидностью данной типовой структуры является эксцентриситет оси колонны относительно оси скважины. Такая структура принята при создании МИ параметров колонны и цемента при контроле технического состояния скважины геофизическими методами.

Поток "вода-нефть-газ" в колонне

К колонне вертикальной добывающей нефтегазовой скважины движется водяной поток, в котором с разными скоростями всплывают капли нефти и пузыри газа.

Такую структуру можно назвать макронеоднородной средой со случайно меняющейся структурой.

На рисунке 25 представлены схемы структуры газожидкостной среды в колонне вертикальной и горизонтальной скважины.

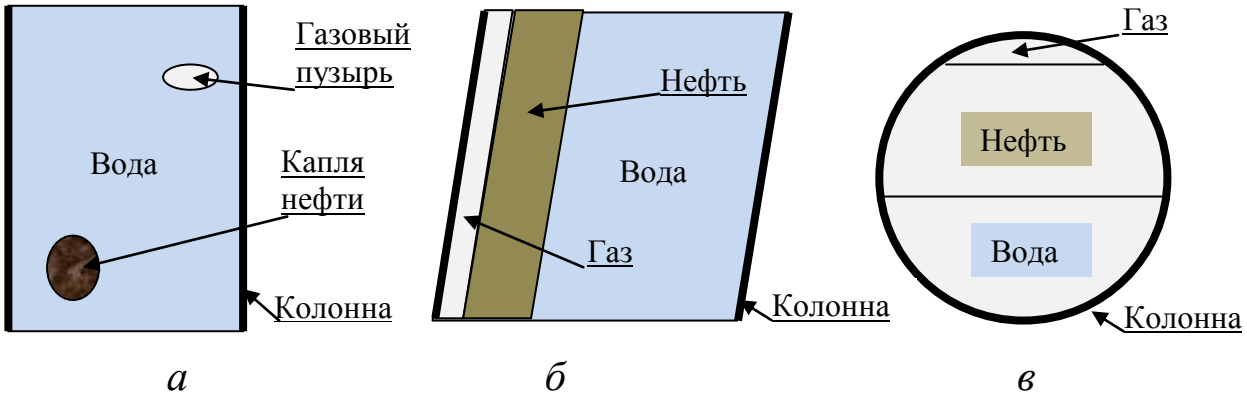


Рисунок 25 – Схемы структуры газожидкостной среды в колонне вертикальной (*а*), наклонно-направленной (*б*) и горизонтальной (*в*) скважины

7.4 Зонд в неоднородной среде

Показания аппаратуры с зондом в однородной среде при его перемещении в пространстве не изменяются, а при перемещении зонда в макро неоднородной среде (с заметными границами раздела) ее показания изменяются. Если зонд в скважине без центрирующего устройства перемещается от одной стенки к другой стенке, то его показания также меняются. Показания всегда изменяются при пересече-

нии зондом границы пласта вдоль оси скважины, что вызывает резкое искривление линии на каротажной диаграмме и дает возможность выделять границы пластов. При движении зонда вдоль оси скважины в пределах пласта большой толщины показания аппаратуры могут не изменяться и выходной сигнал регистрируется в виде прямой линии ("полочки" на диаграмме). Обычно отсчет измеренного значения величины делается именно в этом месте кривой.

Поскольку каротажная кривая представляет собой зафиксированные (зарегистрированные) измененные показания аппаратуры (кажущиеся значения величины) в масштабе времени или в масштабе изменения глубины скважины, то в методике измерений должны быть четкие указания по выбору точки отсчета показаний на зарегистрированной каротажной кривой для дальнейшей обработки при решении измерительной геологической или технической задачи.

7.5 *Кажущееся значение измеряемой величины*

Измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) пластов горных пород аппаратурой электрического каротажа основаны на "методе кажущихся сопротивлений". Этот метод зондирования позволяет выполнять измерения УЭС пласта горной породы при наличии скважины и зоны проникновения. Поскольку среда в поле электрического зонда в скважине неоднородна, то показания аппаратуры не могут соответствовать измеренному значению УЭС ни скважины, ни зоны проникновения, ни пласта. Показания аппаратуры зависят как от параметров однородных структурных зон (пластов, скважины) макронеоднородной (слоистой) горной породы, так и от расположения источников и приемников поля однотипных зондов разной длины относительно границ структурных зон.

Поскольку сама физическая величина как объективная реальность не может быть кажущейся, то "*кажущимся*" следует называть лишь ее *числовое значение* на входе аппаратуры при измерениях этой величины в неоднородной среде при условии, что единица передана аппаратуре в однородной среде. Например, *кажущееся значение УЭС* ($\rho_к$) горной породы или *кажущееся значение коэффициента пористости пласта* при наличии глинистой корки.

Такой же подход был выбран при введении понятия "*среднее значение измеряемого параметра*". При этом конкретизируют алгоритм осреднения, например, "среднее арифметическое значение диаметра скважины", измеренное четырех рычажным каверномером.

Очевидно, что показания на выходе СИ зависят от расположения приемников естественного поля пассивного преобразователя относительно структурных зон или от расположения источников и приемников поля активного измерительного преобразователя относительно структурных зон среды.

Кажущимся значением измеряемой величины неоднородной среды называется ***значение, полученное путем прямых измерений или расчетным путем при фиксированном расположении источников и (или) приемников поля зонда относительно структурных зон неоднородной среды, в предположении, что искусственное поле создается (или естественное поле существует) и его параметры измеряются в условиях, которые были приняты при передаче единицы величины средству измерений от эталона*** [15, 16].

Например, все зонды аппаратуры электрического каротажа калибруют для условий бесконечной однородной среды (без скважины), а измерения всегда выполняются в скважине, пересекающей пласты. Следовательно, выходной сигнал такой аппаратуры всегда отражает только *кажущиеся значения величины*. Кривая нейтронного каротажа вдоль оси разреза скважины также представляет собой кривую кажущихся значений коэффициента пористости. Некажущимися измеренными значениями на этой кривой являются значения напротив тех пластов, в которых условия измерений по структуре среды и химическому составу структурных зон совпадают с условиями калибровки этой аппаратуры.

7.6 Распознавание структуры неоднородной среды

В промысловой геофизике скважинные измерения возможны только после того, как распознана структура исследуемой неоднородной среды в результате интерпретации каротажных диаграмм кажущихся значений измеряемых величин. Распознанная структура соотносится с одной из типовых структур, принятых в типовой методике скважинных измерений.

Необходимо выделить границы пластов и пористые пласты (коллектора), распознать литологию пластов, наличие зоны проникновения фильтрата и глинистой корки на стенке скважины, распознать вещества в поровом пространстве коллектора.

Интерпретация каротажных диаграмм условно делится на два этапа:

1) ***непрерывная*** – первоначальное выделение (распознавание) пластов в разрезе скважины и контактов (водо-нефтяного и нефтегазового) в пласте;

2) ***попластовая*** – распознавание радиальных структурных зон (глинистой корки, промытой зоны, зоны проникновения, окаймляющей зоны, неизмененной части пласта) в пределах пористого пласта с цилиндрическими границами раздела, а также распознавание минералогического состава пласта (песчаник, кальцит, доломит, ангидрит, глина).

Заранее известно, что слоистая горная порода пересечена цилиндрической скважиной поперек (вертикальная или наклонно направленная скважина) или вдоль пласта (горизонтальная скважина). Скважина в поперечном сечении не имеет форму идеального круга, на ее поверхности всегда имеются микрокаверны от долота, макрокаверны в глинах от циркуляции промывочной жидкости и желоба, образовавшиеся от вращения и перемещения бурильных труб. В пористых проницаемых пластах на стенке скважины образуется глинистый цилиндрический слой ("*глинистая корка*"). Форма поперечного сечения скважины распознается по параметрам, измеренным скважинным рычажным каверномером-профилемером или акустическим профилемером.

Границы достаточно толстых пластов выделяют по кривым кажущихся значений измеряемых электрических, акустических, ядерно-геофизических величин. Тонкие пропластки могут оставаться не распознанными и их границы не выделенными.

Типовые способы определения границ пластов. Обычно за границу пласта на каротажной диаграмме для большинства зондов принимается значение глубины, соответствующее середине возрастающей или убывающей кривой кажущихся значений измеряемой величины. Для градиент-зондов границе пласта соответствует глубина, где наблюдается начало резкого изменения кажущихся значений измеряемой величины.

Типовые способы определения цилиндрических границ в пористом пласте. Структуру пористого проницаемого пласта в радиальном направлении от оси скважины определяют методом разноглубинного бокового зондирования с использованием однотипных зондов разной длины (например, известная методика БКЗ). Различают зону кольматации (зону растрескивания породы с глинистыми частицами в трещинах), промытую зону и зону проникновения. Границы зон в пористом пласте условно принимают цилиндрическими. Цилиндрический глинистый слой (глинистая корка) на стенке скважины является признаком коллектора. Толщина глинистой корки измеряется каверномером в составе микро-зондов.

7.7 *Методики скважинных измерений*

Напомним, что "***измерением***" называется "***совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины***". Значит, под скважинным (геофизическим) измерением следует понимать всю совокупность операций, выполняемых для определения значений измеряемых параметров каждого конкретного пласта, пересеченного скважиной, и параметров этой скважины в каждой конкретной точке вдоль оси скважины. Следует также различать прямые, косвенные, совместные и совокупные скважинные измерения [2, 19].

К прямым относятся измерения параметров пластов и скважин, выполняемые с использованием номинальных или индивидуальных КФ скважинной аппаратуры и с введением всех предусмотренных поправок. Следует отметить, что процедура выделения пластов в разрезе скважины по каротажным кривым относится к прямым скважинным измерениям, так как при этом определяется количественное значение толщины каждого из выделенных пластов в единицах длины - в метрах.

Косвенно измеряются параметры пластов с использованием функциональных зависимостей (формул), в которых аргументами являются параметры, измеренные прямыми или другими косвенными методами. Например, к косвенным относятся измерения коэффициента нефтенасыщенности пласта через удельное электрическое сопротивление (УЭС) пласта и пластовой воды, а также коэффициент общей пористости пласта через плотность пласта, плотность твердого

вещества (скелета) и плотность жидкой фазы. Видно, что "*количественная геологическая интерпретация*" – это не что иное, как косвенные измерения. Кстати, "*подсчет запасов нефти*" – это тоже косвенные измерения объема или массы нефти в залежи по результатам скважинных и площадных измерений [12], а вовсе не "*подсчет*".

К совокупным можно отнести измерения кажущихся значений УЭС градиент-зондами разной длины с последующим решением системы уравнений с целью измерения УЭС отдельных структурных зон - пласта, зоны проникновения и ее диаметра. Эта совокупность измерительных операций ошибочно называют "*количественной геофизической интерпретацией*".

Измерения в скважинах с использованием комплексной многоканальной скважинной аппаратуры относятся к совместным измерениям, которые иногда по-прежнему называют"*комплексной геофизической и геологической интерпретацией*".

Обычно ГИС выполняют с целью выявления продуктивных пластов, содержащих полезные ископаемые (нефть, газ и другие), и определения параметров, отражающих их пространственную геометрическую структуру и вещественный состав (извлекаемые запасы). Достижение этой цели возможно только на основе применения научно обоснованных ***методик скважинных измерений*** (МСИ) параметров пластов, пересеченных скважиной. Любая МСИ должна быть оформлена в виде стандартизованного текстового документа и аттестована применительно к условиям конкретного пласта или месторождения в целом. В методике должны быть изложены все операции, которые необходимо выполнить, чтобы получить измеренное значение параметра пласта с необходимой точностью и указать обоснованные погрешности выполненных измерений.

В методике должно быть четко определено, какую точку на каротажной кривой в пределах пласта следует принять за показания аппаратуры. Это значение измеряемой величины может быть "кажущимся", если условия измерений не совпадают с условиями калибровки аппаратуры, или "некажущимися", если эти условия совпадают. Обычно за показания аппаратуры (отсчет) принимают экстремальное значение или среднее значение напротив середины пласта. Однако для градиент-зондов выбирают точку на "полочке" кажущихся значений, а не экстремальное значение.

Максимальная точность скважинных измерений параметров пластов достигается уменьшением систематических погрешностей от множества влияющих факторов следующими путями (методами):

1) ***совокупными измерениями*** кажущихся значений зондами разной длины в известных условиях их применимости (разноглубинное зондирование) и решением системы уравнений;

2) ***совместными измерениями*** параметра пласта и влияющих факторов с использованием КПФ скважинной аппаратуры в виде функции двух или трех переменных;

3) ***прямыми измерениями*** параметров пласта в условиях, максимально приближенных к условиям калибровки аппаратуры, с введением минимума (одной или двух) известных поправок.

Обоснование погрешности выполненных скважинных измерений заключается в полноте учета источников погрешности аппаратуры и предусмотренных поправок при суммировании составляющих погрешности.

Если значение какого-либо влияющего фактора неизвестно, то вводится половина поправки, а ее вторая половина принимается за погрешность и суммируется со всеми остальными ее составляющими.

Таким образом, решение измерительных и классификационных задач на основе методик скважинных геофизических измерений является не только целью, но и сутью ГИС.

Исторически сложилось так, что первые создатели методов геофизических исследований в скважинах (С.Г. Комаров, Л.М. Альпин, В.Н. Дахнов и др.) весь процесс исследований разделили на два основных этапа:

1) измерения в скважинах – получение кривых (кажущихся значений) геофизических параметров в функции глубины скважины (каротажных диаграмм);

2) интерпретация каротажных диаграмм [35].

В свою очередь, этап интерпретации был условно разделен еще на три этапа: 1) исправление показаний зондов и датчиков (введение поправок в зарегистрированные кривые); 2) геофизическая интерпретация; 3) геологическая интерпретация. В.Н. Дахнов выделял отдельно еще 4-й этап – "обобщающая или площадная интерпретация" и подсчет запасов. Причем считалось, что измерения заканчиваются получением первичных каротажных диаграмм, а далее выполняется только интерпретация полученных кривых, которая не относится к

измерениям. Однако все же отмечалось, что "…*процедуру оценки параметров можно рассматривать как сложное средство косвенных измерений, канал связи которого состоит из разнородных элементов, таких как скважинный прибор, наземная аппаратура, оператор, интерпретатор, петрофизические зависимости и других*". Упоминалось также: "… *в общем случае на точность представляемых геофизической службой результатов влияет точность измерений при регистрации диаграмм и достоверность последующей интерпретации*…". Авторы некоторых монографий упоминали о "*погрешности интерпретации*", подразумевая под этим погрешности измерений конкретных параметров.

Ранее различали также "*количественную интерпретацию*" - определение числовых значений параметров пластов и скважин и "*качественную интерпретацию*" - разделение объектов на классы. Причем делались попытки оценки точности количественной интерпретации ГИС методами математического моделирования, а также оценивалась эффективность качественной интерпретации результатов ГИС статистическими показателями [29, 35].

7.8 *Интерпретация результатов скважинных измерений*

Классификационные задачи ГИС решаются преимущественно на основе предварительно решенных измерительных задач. Поэтому следует отличать "геологическую интерпретацию результатов измерений" от собственно самих "скважинных геофизических измерений" параметров пластов и скважин.

Интерпретация чего-либо – это истолкование (объяснение, разъяснение) смысла или значения чего-либо. Под интерпретацией данных при проведении ГИС (интерпретация результатов скважинных измерений) будем понимать совокупность операций, направленных на решение **классификационных задач** при выполнении геофизических исследований и работ в скважинах на основании истолкования результатов скважинных измерений.

В прежнем понимании "интерпретация" – это истолкование каротажных диаграмм – результатов кажущихся значений измеряемых параметров. Такое определение ошибочно настраивало исследователя-геофизика на то, что измерительный процесс закончился на сква-

жине получением каротажной диаграммы, а далее последует новый этап – интерпретация, то есть уже не измерение. Поэтому параметры пластов и скважин уже не измерялись, а "определялись" или "вычислялись". Полученные таким образом значения параметров пластов и скважин, как результат интерпретации, передавались заказчикам геофизических услуг без оценки погрешностей фактически выполненных прямых или косвенных скважинных измерений.

Классификационная задача – это конкретная задача, решением которой является отнесение исследуемого объекта к тому или иному классу объектов.

К типовым классификационным задачам ГИС относятся следующие [15, 29]:

- выявление пластов-коллекторов;
- распределение пластов, пересеченных скважиной, на классы по геологическому признаку (песчаник, кальцит, доломит, ангидрит, гипс, глина, уголь и т.д.);
- определение характера насыщения пластов-коллекторов (газонасыщенный, нефтенасыщенный, водонасыщенный) по установленным критериям;
- заключение о герметичности заколонного пространства при оценке показателей качества цементирования скважин.

Показателем качества решения задач классификации является максимальная вероятность правильной (достоверной) классификации объектов. Эта вероятность зависит как от размытости границ измеряемого параметра, определяющего классификационный признак объекта, так и от границ возможной погрешности измерений этого параметра объекта (вернее параметра модели объекта) [14].

Рассмотрим простой случай, когда граничное значение параметра классификационного признака объекта выражено одним строго определенным числом. Тогда максимальная вероятность достоверной классификации объектов определяется только нормированными пределами или оценками погрешности измерений этого параметра вблизи его граничного значения.

Если бы погрешности измерений параметра были равны нулю, то вероятность достоверной классификации в этом случае была бы всегда 100 % при любом измеренном значении параметра X. При этом, если измеренные числовые значения параметра меньше граничного значения, то объект относится строго к первому классу (группе)

объектов, а если больше, то ко второму. Однако погрешности измерений никогда не могут быть равными нулю. Поэтому при нахождении измеренного значения параметра в пределах доверительных границ абсолютной погрешности выполненных измерений по обе стороны от граничного значения параметра вероятность достоверной классификации уже будет меньше 100 %. При равенстве измеренного и граничного значений параметра вероятность правильной классификации принимает минимальное значение 50 % (фифти-фифти), рисунок 26.

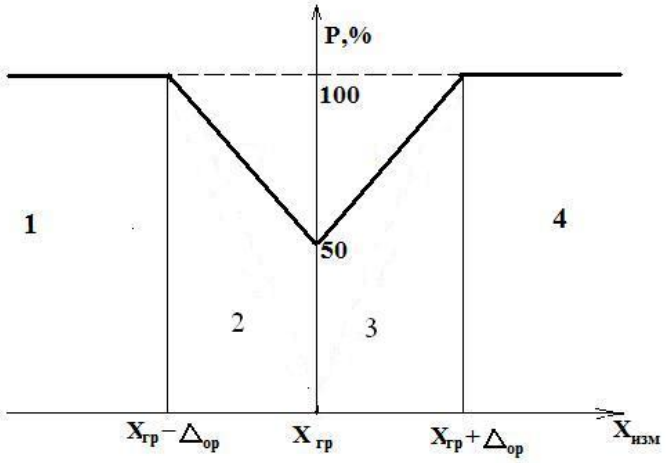


Рисунок 26 – График функции вероятности достоверной классификации объектов на два класса при фиксированном граничном значении измеряемого параметра

Для построения данного графика кусочно-линейной функции выбран теоретический равномерный закон распределения погрешностей измерений в пределах их нормированных значений. Это один из наихудших случаев распределения погрешностей измерений.

В таблице 4 представлены различные варианты заключения о достоверности разделения объектов на два класса в зависимости от нахождения измеренного значения параметра относительно его граничного значения.

Таблица 4 – Заключения о достоверности разделения объектов на два класса

Зона на рисунке	Критерий для заключения - область нахождения измеренного значения	Заключения о достоверности интерпретации
1	$X_{изм} \le X_{гр} - \Delta_{ор}$	Первый класс (100%)
2	$X_{гр} - \Delta_{ор} < X_{изм} < X_{гр}$	Возможно первый класс

3	$X_{гр} < X_{изм} < X_{гр} + \Delta_{ор}$	Возможно второй класс
4	$X_{изм} \geq X_{гр} + \Delta_{ор}$	Второй класс (100%)

Видно, что уверенное разделение объектов на два класса возможно только при нахождении измеренного значения информативного параметра в зонах 1 и 4. В зонах 2 и 3 такая уверенность отсутствует.

При оценке вероятности $P_{дкл}$ правильной классификации нас интересуют только зоны 2 и 3 на рисунке 18 с областью нахождения измеренного значения параметра $X_{изм}$ в интервале $X_{гр} - \Delta_{ор} < X_{изм} < X_{гр} + \Delta_{ор}$, для которого вероятность правильной (достоверной) классификации в % вычисляется по формуле

$$P_{дкл} = (1 - \frac{\Delta_{ор} - \left| X_{изм} - X_{гр} \right|}{2 \cdot \Delta_{ор}}) \cdot 100\% . \qquad (40)$$

Таким образом, показатель достоверности классификации может быть легко вычислен и использован при представлении результата решения любой классификационной задачи ГИС, когда измеренное значение параметра приближается к нормированному граничному значению измеряемого параметра. Поскольку представленные рассуждения показаны для равномерного (худшего) закона распределения погрешности измерений, то действительные значения показателя достоверности классификации будут выше.

Если граничное значение параметра представлено не одним числом, а интервалом на числовой оси, то задача оценки показателей достоверности правильной классификации объектов по данному измеряемому параметру усложняется.

7.9 Принципы выделения однородных структурных зон в пласте и скважине

Поскольку понятие «физическая величина» применимо только к однородным средам, то необходимо установить критерии, по которым можно выделять границы однородных объектов ГИС.

Признаками коллектора являются признаки, обусловленные проникновением фильтрата промывочной жидкости в пласт. Например, наличие глинистой корки на стенке скважины, зоны проникно-

вения по БКЗ и ВИКИЗ, снижение плотности по ГГК-П по сравнению с показаниями в плотном пласте, повышение показаний по НК по сравнению с показаниями в плотном пласте, повышенные значения МЭД по ГК и уменьшение показаний по ПС.

Выделение коллекторов основано на следующих признаках.

1) образование глинистой корки на стенке скважины;

2) образование зоны проникновения фильтрата в пласт.

Плотность глинистой корки изменяется от стенки скважины до контакта с промывочной жидкостью.

Плотность и УЭС зоны проникновения изменяется от стенки скважины до незатронутой проникновением части пласта.

Пласт с переслаивающимися пропластками толщиной менее 0,2 м объединяют в один пласт.

К особенностям измерений в неоднородных средах относят необходимость введения понятий "геометрический фактор" и "кажущееся значение величины".

7.10 *Методические погрешности МСИ*

Сложность построения и реализации МСИ параметров пластов и скважины заключается в том, что заранее структура среды неизвестна.

При этом приходится подбирать такую МИ, чтобы принятая типовая структура среды была адекватна реальной структуре среды с максимально возможной степенью соответствия. Степень неадекватности реальной структуры горных пород, пересеченных скважиной, и выбранной типовой модели структуры среды определяется совокупностью методических погрешностей измерений параметров пластов и скважины [15, 29].

Как правило, МИ параметров структурных зон неоднородных сред должна строиться для типовой структуры среды (при ГИС - это двухслойная или трехслойная коаксиально-цилиндрическая среда, с вмещающими пластами или без них и т.д.) [14, 29].

Модель (схема конструкции) типовой структуры среды – это упрощенное описание структуры реальной среды, являющееся неотъемлемой частью любой МИ такого класса объектов измерений.

Структурной зоной объекта (предмета) будем называть ограни-

ченную область объекта, в пределах которой физическая величина, отражающая изучаемое свойство, не меняет своего качественного и количественного содержания. Будем считать, что на бесконечно тонких границах структурных зон физическая величина изменяется ступенчато (скачком). Если граница структурной зоны имеет не нулевую толщину и известна закономерность изменения физической величины по толщине, то такую "границу" называют "переходной структурной зоной".

Датчик (зонд, первичный преобразователь) аппаратуры может располагаться относительно исследуемой структурной зоны неоднородной среды по-разному. Он может находиться непосредственно в исследуемой структурной зоне (в скважине) под влиянием соседней зоны (пласта). Он может быть внутри соседней зоны, граничащей с исследуемой структурной зоной (пластом), или в удаленной структурной зоне, не имеющей общей границы с исследуемой зоной (пластом с зоной проникновения).

Лишь в первом случае при значительных размерах исследуемой структурной зоны, когда поле датчика (зонда) не распространяется до границ с соседними структурными зонами, методика выполнения измерений параметра исследуемой среды не будет отличаться от известных общепринятых методик для однородных сред [15].

Во всех остальных случаях в поле датчика будут находиться другие структурные зоны. Это означает, что при выполнении измерений параметра исследуемой среды влияние других зон необходимо знать и определенным образом учитывать.

Поскольку исследуется неоднородная в радиальном и вертикальном направлении среда, то параметры, отражающие свойства горных пород, в большинстве случаев не могут быть измерены непосредственно в скважине.

Пласты горной породы всегда пересечены скважиной, заполненной промывочной жидкостью. Свойства пластов на контакте со скважиной изменены, и на них влияют также соседние пласты. Характеристики физического поля, созданные зондами в неоднородной среде, зависят как от параметров среды, так и от параметров зонда.

Под методической составляющей погрешности измерений понимают погрешности, возникающие в измерительном процессе при условии применения "идеальных" средств измерений "идеальным" оператором, то есть, когда инструментальные и субъективные по-

грешности принимаются равными нулю [15].

При ГИС эти погрешности проявляются даже при условии применения "идеальной" геофизической аппаратуры. Например, в простейшем случае при расположении инклинометра в каверне или желобе его ось не совпадает с осью скважины (согласно принятой МИ они должны совпадать). Возникает методическая погрешность, не зависящая от метрологических свойств инклинометра [14].

Неоднородность среды является одним из источников методической погрешности скважинных измерений параметров пластов и скважин. Они возникают, например, в результате отличия реальной структуры среды от принятой типовой модели структуры среды или несоответствия расположения зонда, принятого в МИ, реальному его расположению.

В таблице 5 приведена классификация источников возникновения методической составляющей погрешности измерений параметров пластов и скважины [15].

Таблица 5 – Классификация источников возникновения методической погрешности измерений параметров пластов и скважины

Классификационный признак	Источники возникновения методической погрешности
1 Неадекватность принятой в МВИ типовой и реальной структуры исследуемой среды, находящейся в поле зонда	• Влияние свойств и линейных размеров структурных зон среды, неучтенных в МИ • Несоответствие взаимного расположения зон типовой структуры среды, принятой в типовой МИ, их реальному расположению при выполнении измерений • Несоответствие реального (принятого) и идеального (требуемого) алгоритмов "осреднения" параметров в пределах одной неоднородной зоны или нескольких однородных (или неоднородных) зон, а также на границах между ними • Неучитываемая анизотропия свойств структурных зон
2 Взаимное расположение элементов зонда и среды	• Несоответствие взаимного расположения источников и приемников поля относительно структурных зон среды при математическом или физическом моделировании (в МИ) и при выполнении реальных измерений
3 Неточность вычислительных процедур	• Применение упрощенных алгоритмов вычислений • Ограниченность числа разрядов технических средств и программ вычислений

Методические погрешности носят, как правило, систематический характер. Обычно их оценивают на этапе построения и метрологической аттестации МИ конкретного параметра с целью установления ограничений ее применимости с нормированными показателями точности.

Неоднородность среды также порождает необходимость введения новых метрологических характеристик скважинной аппаратуры, отражающих глубинность и разрешающую способность зондов. Эти характеристики также необходимы при установлении ограничений применимости МИ [15].

Чтобы иметь возможность математического анализа методических составляющих погрешности измерений параметров пластов и скважин методом бокового (разноглубинного) зондирования, разработана методика (способ) нахождения оценки методической погрешности по аналогии с методикой оценки поправки к показаниям аппаратуры.

При этом важно понять, что принимать за измеренное значение параметра, а что – за истинное значение параметра.

Как известно, применение для измерений параметров пласта и скважины метода бокового зондирования предполагает предварительное выполнение прямых измерений кажущихся значений параметра зондами разной длины и соответственно – разной глубинности.

Предлагаемый способ определения методических составляющих погрешности измерений параметров пластов и скважины основан на математическом моделировании измерительного процесса, выполняемого в неоднородной среде.

Для реализации данного способа необходимо моделировать две МИ – рабочую и эталонную (референтную) методику. Эталонная МИ построена с возможностью учета влияющего фактора. В рабочей МИ такая возможность отсутствует. Причем в каждой МИ должна быть предусмотрена возможность расчета кажущегося значения параметра для одного и того же расположения элементов зонда скважинной аппаратуры относительно границ структурных зон среды.

Схема, поясняющая данный способ определения методических составляющих погрешности измерений параметров пластов и скважины, показана на рисунке 27 [15].

Первоначально выбирается (задается) эталонное значение измеряемого параметра $W_{эт}$ в диапазоне реальных его изменений и значение параметра (параметров) фактора, влияние которого на методиче-

скую составляющую погрешности предполагается оценивать.

Затем, используя из ***референтной*** (эталонной) МИ формулу для расчета кажущихся показаний на выходе аппаратуры при выбранном фиксированном расположении ее зонда относительно границ пласта, выполняется расчет кажущегося значения параметра $W_к^{'}$.

После чего моделируется процесс измерений с использованием ***рабочей*** МИ (без учета влияющего фактора). При этом осуществляется подбор такого значения $W_{изм}$, для которого расчетное кажущееся значение $W_к^{''}$ близко к $W_к^{'}$.

Сначала вычисляется поправка как разность между "эталонным" значением параметра $W_{эт}$, полученным по эталонной МИ (с учетом влияющего фактора), и измеренным значением параметра $W_{изм}$, полученным по рабочей МИ (без учета влияющего фактора).

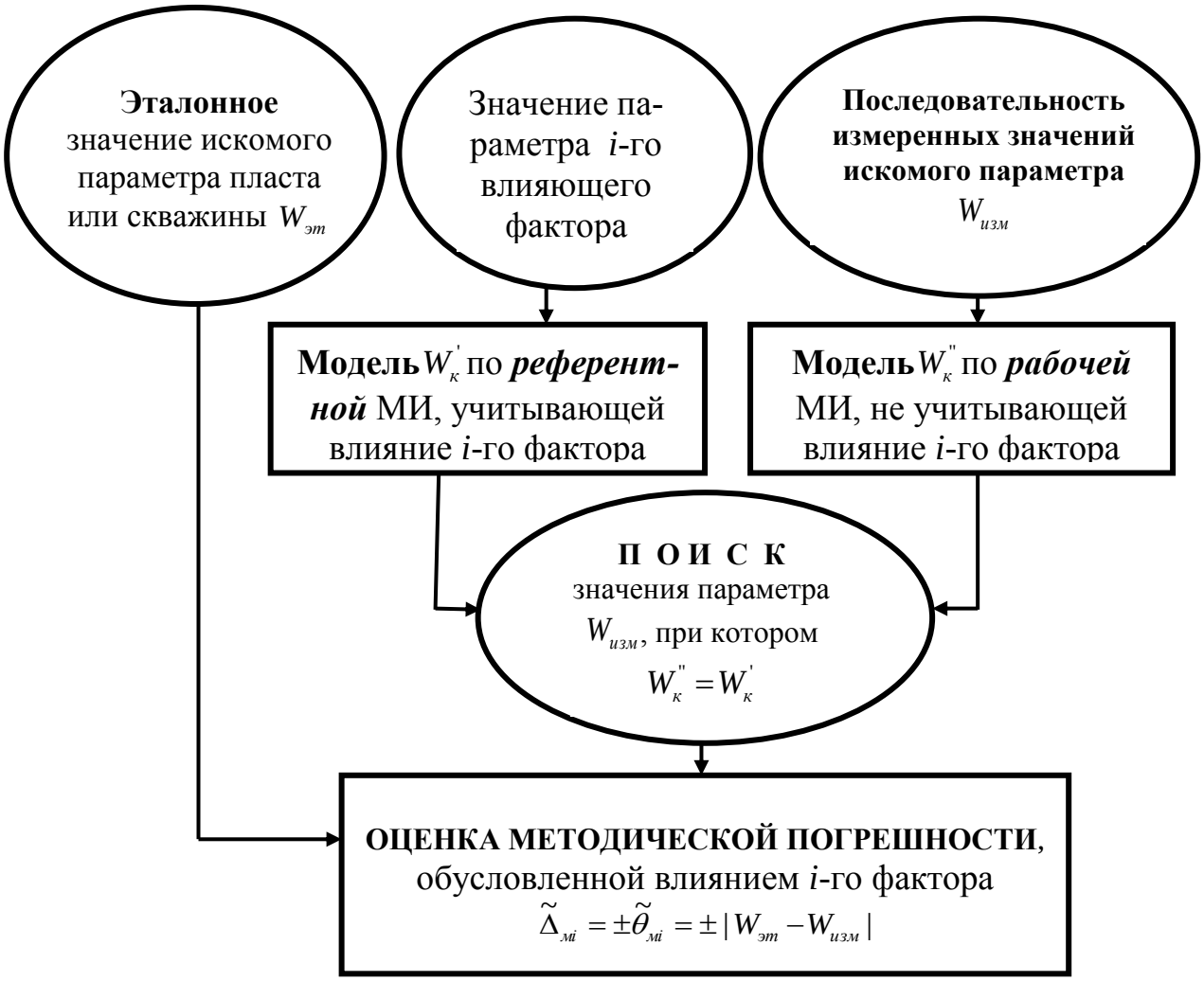


Рисунок 27 – Схема процесса оценивания методических состав-

ляющих погрешности измерений параметров пластов и скважины

За оценку методической погрешности принимается абсолютное значение вычисленной поправки с символом "±".

В результате рассмотренной процедуры получена одна оценка на поле методических погрешностей измерений для одного заданного значения измеряемого параметра $W_{эт}$ для данного влияющего фактора. Чтобы анализировать все поле возможных методических погрешностей от влияющего фактора, необходимо выполнить многократное их моделирование при разных значениях геометрических и физических параметров влияющего фактора для разных значений измеряемого параметра.

Данную методику можно считать универсальной как для математического, так и для физического моделирования процесса измерений параметров в неоднородных средах.

Оцененные методические погрешности геофизических измерений служат основой для установления применимости каждой конкретной методики измерений.

Методические погрешности измерений параметров пластов, пересеченных скважиной, могут быть уменьшены только путем создания более совершенной методики, для которой оставшиеся неизвестные методические погрешности будут определять ограничения ее применимости. Значит, систематические методические погрешности измерений не могут быть уменьшены путем введения поправок.

7.11 Инструментальные погрешности скважинных измерений

Инструментальные погрешности скважинных измерений обусловлены следующими факторами [14, 15]:

- неидеальностью скважинных и наземных средств измерений, соединенных каналом связи и образующих измерительную систему;
- взаимодействием датчика аппаратуры с объектом измерений;
- ограниченной радиальной разрешающей способностью зондов;
- ограниченной вертикальной разрешающей способностью зондов;
- неидеальностью эталонов, воспроизводящих параметры пластов и скважин и применяемых для калибровки скважинной аппаратуры.

Неидеальность скважинных средств измерений проявляется в отличии реальной функции преобразования от номинальной КФ, приписанной для совокупности однотипных средств измерений.

Различают характеристики основной и дополнительной погрешностей средств измерений. Характеристики первой оцениваются в нормальных условиях, характеристики второй – в рабочих.

Характеристики основной погрешности аппаратуры отражают наличие систематической и случайной составляющих погрешности, вариации (люфтов) и нестабильности во времени.

Характеристики дополнительной погрешности отражают реакцию аппаратуры на воздействие влияющих факторов, значения которых отличаются от нормальных значений.

Взаимодействие датчика с объектом часто вызывает изменение значения измеряемой величины. Например, скважинный пакерный расходомер увеличивает гидравлическое сопротивление жидкости (перекрывает сечение скважины) и уменьшает значение измеряемого расхода жидкости в скважине. Массивный скважинный термометр может изменить значение измеряемой температуры в исследуемой точке скважины путем охлаждения или нагрева скважинной газожидкостной среды.

Ограниченная вертикальная разрешающая способность зондов вызывает инструментальную составляющую погрешности измерений параметров пластов ограниченной мощности, что при определенном соотношении параметров пластов не позволяет даже выделить тонкие пласты и пропластки.

Ограниченная радиальная разрешающая способность зондов вызывает погрешности измерений параметров пласта при наличии глубокой зоны проникновения и других цилиндрических зон. Поле зонда распространяется в радиально-неоднородной среде таким образом, что доля полезного сигнала из исследуемого пласта составляет незначительную часть от общего уровня выходного сигнала, зонд "не дотягивается" до неизмененной части пласта и теряет чувствительность к измеряемому параметру.

Ограниченную вертикальную и радиальную разрешающую способность зондов нельзя рассматривать как "чисто" инструментальную, так как эти характеристики аппаратуры неизбежно связаны со структурой неоднородной горной породы, пересеченной скважиной.

Другим источником инструментальной погрешности является

неидеальность эталонов единиц физических величин, эталонных средств измерений и системы передачи единиц величин. Именно погрешностями эталонов геофизических параметров определяются минимально возможные погрешности скважинной аппаратуры. Кроме того, для построения многих функций влияния также используются модели пластов, погрешности которых становятся определяющими систематическими погрешностями аппаратуры после введения поправок с использованием номинальной или индивидуальной поправочной функции влияния.

Ограниченное количество эталонных моделей пластов, используемых как для калибровки скважинной аппаратуры, так и для построения поправочных функций влияния, также является одним из источников инструментальной составляющей погрешности скважинных измерений параметров пластов. Например, при калибровке аппаратуры нейтронного каротажа для условий песчаного пласта часто используются только две эталонные насыпные модели пласта, воспроизводящие коэффициент общей пористости 15 и 35 % водонасыщенного пласта. В этих условиях через две точки можно провести только прямую линию, в то время как реальная КФ аппаратуры НК нелинейная.

Неконтролируемых источников инструментальной составляющей погрешности скважинных измерений много. В большинстве случаев измерения параметров пластов и скважины методами ГИС с оценкой и указанием погрешности в современных условиях весьма проблематичны.

Уровень культуры измерений при ГИС связан с уровнем их метрологического обеспечения. Кроме того, заказчик геофизических услуг испытывает необходимость оценки погрешности выполненных измерений параметров пластов и скважины и требует это от специалистов геофизических предприятий.

Одним из решений задачи уменьшения инструментальной погрешности скважинных измерений является выбор научно обоснованного комплекса нормируемых МХ скважинной аппаратуры при ее разработке и испытаниях, а также оценка и периодический контроль основных поправок к измеренным значениям в условиях геофизических предприятий.

В комплекс НМХ для каждого измерительного канала геофизической аппаратуры рекомендуется включать следующие характери-

стики в относительной форме:

$(\delta_{od})_{скв}$ – допускаемая основная относительная погрешность скважинной части аппаратуры (скважинного преобразователя);

$(\delta_{od})_{наз}$ – допускаемая основная относительная погрешность наземного преобразователя (регистратора);

$\delta_{\partial}(T)$ – граничная функция влияния температуры скважинной среды на погрешность зонда аппаратуры;

Если случайная составляющая погрешности канала существенна, то вместо характеристик основной погрешности могут быть нормированы характеристики составляющих основной относительной погрешности ($\delta_{os\partial}$ – допускаемая систематическая основная относительная погрешность и $\sigma_{\partial}[\delta_o]$ – допускаемое среднее квадратическое отклонение случайной составляющей основной относительной погрешности).

Необходимость расчета погрешности скважинной аппаратуры в реальных условиях ее применения возникает при решении ответственных измерительных задач ГИС, когда требуется обоснованная количественная информация о параметрах пласта, например для оценки первоначальных запасов или уточнение текущих запасов углеводородного сырья на месторождениях.

Причем расчетная оценка инструментальной погрешности выполненных измерений параметра пласта может оказаться единственной, если выполняются все требования по ограничению применимости МИ, построенной на базе конкретной измерительной скважинной аппаратуры.

Нормированные значения характеристик погрешности скважинной аппаратуры могут быть выражены как в относительной форме, так и в абсолютной форме. Для упрощения вида формул и суммирования отдельных составляющих погрешности с целью нахождения границ результирующей погрешности все НМХ представляются в относительной форме.

Формула для определения относительной погрешности скважинной аппаратуры в реальных условиях ее эксплуатации имеет следующий вид [15]:

$$\tilde{\delta} = \pm\kappa \cdot \sqrt{(\delta_{od}^2)_{скв} + (\delta_{od}^2)_{наз} + \delta_{\partial}^2(T_c) + \sum_{i=1}^{m} \delta_{\partial oni}^2}\,, \qquad (41)$$

где k =1,4 при вероятности $P=0,99$ (по ГОСТ 8.207-76); $(\delta_{ор})_с$, $(\delta_{ор})_н$, $\delta_д(T_с)$, $(\delta_{дт})_н$, $(\delta_{ди})_с$, $(\delta_{ди})_н$ – нормированные значения характеристик относительной погрешности скважинной и наземной частей аппаратуры, $\delta_{доп i}$ – нормированное или оцененное значение дополнительной относительной погрешности, обусловленной i-м из m существенно влияющих факторов.

Если нормы на характеристики погрешности были установлены в абсолютной форме и (или) в зависимости от измеряемого параметра X, то следует вычислить нормированные значения характеристик погрешности для скважинных и наземных средств измерений, входящих в состав аппаратуры, в относительной форме (в долях единицы).

Рассмотрим числовой пример расчета погрешности аппаратуры электрометрии К1-723 по каналам градиент-зондирования. Исходные данные для расчета погрешности данной аппаратуры по ее НМХ приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета погрешности данной аппаратуры К1-723 по ее НМХ

Наименование параметра исходных данных для расчета	Числовое значение параметра
Измеренное кажущееся значение УЭС	$\rho_к$ = 50 Ом·м
Допускаемая основная относительная погрешность, $\rho_в$ = 1000 Ом·м – верхнее значение диапазона измерений	$\delta_{од}$= ±[5+0,1 ($\rho_в/\rho_к$-1)]
Граничная функция влияния температуры скважинной среды на погрешность аппаратуры	$\delta_д(T)$ = 0,01$\delta_{од}$ (T - $T_о$), где$T_о$ = 20°С
Допускаемая погрешность аппаратуры при изменении напряжения питания	$\delta_{ди}$ = 0,3·$\delta_{од}$
Глубина точки записи УЭС	L = 3667 м
Температурный градиент в скважине	G_m = 0,03 °С/м
Температура на устье скважины	$T_у$ = 10°С

Расчет погрешности аппаратуры в реальных условиях ее применения выполняется в следующей последовательности.

1 Нормированная допускаемая основная относительная погрешность

$$\delta_{od} = \pm[\,5 + 0{,}1\,((\rho_в/\rho_к) - 1)] = \pm[\,5 + 0{,}1\,((1000/50) - 1)] \approx \pm\,7{,}0\ \%.$$

2 Температура корпуса аппаратуры в скважине на глубине 3667 м

$$T_c = T_y + G \cdot L = 10 + 0{,}03 \cdot 3667 = 120\ °C.$$

3 Относительная температурная погрешность аппаратуры (при T_c = 120 °С)

$$\delta_д\,(T_c) = \pm 0{,}01\,\delta_{od}\,(T_c - T_o) = \pm 0{,}01 \cdot 7 \cdot (120 - 20) = \pm 7{,}0\ \%.$$

4 Допускаемая погрешность аппаратуры при изменении напряжения питания

$$\delta_{pu} = 0{,}3\,\delta_{op} = \pm 0{,}3 \cdot 7\% = \pm 2{,}1\ \%.$$

5 Погрешности аппаратуры К1-723 в реальных условиях ее применения при измерении удельного электрического сопротивления 50 Ом·м на глубине 3667 м при P = 0,95

$$\delta_{0,95} = \pm k \cdot \sqrt{\delta_{op}^2 + \delta_д^2(T_c) + \delta_{du}^2},$$

$$\delta_{0,95} = 1{,}1 \cdot \sqrt{7{,}0^2 + 7{,}0^2 + 2{,}1^2} = \pm 11{,}13\%.$$

6 Результат измерений кажущегося значения удельного электрического сопротивления в скважине:

$$\rho_к = 50\,(1{,}000 \pm 0{,}111)\ \text{Ом·м} = (50{,}0 \pm 5{,}6)\ \text{Ом·м};\ \ P = 0{,}95.$$

Примерно по такой схеме может быть рассчитана инструментальная погрешность измерений параметра с использованием любой скважинной аппаратуры, для которой имеется обоснованный комплекс НМХ.

7.12 Скважинные измерения концентрации веществ

Скважинные измерения концентрации веществ относятся к категории особых косвенно-совокупных измерений. Они, как и методика БКЗ, предполагают составление и решение системы уравнений.

По объектам исследований их можно разделить на следующие измерения:

- концентрации веществ (минералов) в твердой фазе коллектора (песчаник, кальцит, доломит, ангидрит и т.п.);

- концентрации веществ в поровом пространстве коллектора (вода, нефть, газ, глина);

- концентрации радиоактивных веществ в глинах (уран, торий, калий);

- концентрации веществ в потоке в добывающей скважины (вода, нефть, газ).

Концентрация – это отношение объема (или массы) выделенного чистого вещества к общему объему (или к общей массе) смеси веществ.

Относительная ***единица концентрации*** – доля единицы или проценты.

Эталоны концентрации – стандартные образцы состава и свойств вещества с известной концентрацией измеряемой концентрации вещества.

Концентрацию веществ в поровом пространстве коллектора называют ***коэффициентами***:

- коэффициент водонасыщенности;
- коэффициент нефтенасыщенности;
- коэффициент газонасыщенности;
- коэффициент глинистости.

Концентрацию веществ в смеси можно измерить косвенно по физическим величинам, значения которых различны для каждой составляющей смеси. Например, вода, нефть, газ, глина имеют разную плотность, а уран, торий и калий – разный спектр энергий излучаемых гамма-квантов.

Концентрация двух компонентов

Пусть требуется измерить концентрацию двух компонентов C_1 и C_2 в смеси вещества. При этом известны показания прибора при стопроцентном содержании чистого компонента X_1 и X_2. Причем известно, что $X_1 > X_2$.

Имеем следующую систему двух уравнений с двумя неизвестными C_1 и C_2:

$$1 = C_1 + C_2$$
$$X_{изм} = C_1 X_1 + C_2 X_2.$$

Решая систему, находим

$$C_1 = \frac{X_{изм} - X_2}{X_1 - X_2} \qquad C_2 = \frac{X_1 - X_{изм}}{X_1 - X_2} \tag{42}$$

По показаниям прибора $X_{изм}$ сразу находим (вычисляем) измеренные значения C_1 и C_2.

Концентрация трёх компонентов

Пусть требуется измерить концентрацию трех компонентов C_1, C_2 и C_3 в смеси вещества. При этом известны показания трех приборов X_1, X_2 и X_3 при измерениях в смеси этих компонентов. Очевидно, одним прибором измерить три параметра невозможно.

Показания каждого из трех приборов будут взаимозависимы от концентрации веществ и будут меняться при изменении сочетания двух других веществ (от показаний двух других приборов).

Калибровочные функции имеют одинаковый вид, но разные коэффициенты перед переменными показаниями приборов.

Если все зависимости взаимных влияний линейные, то каждую КФ можно искать в виде функции 3-х переменных с 8-ю коэффициентами:

$$\begin{aligned} C_1 &= a_1 + b_1X + c_1U + d_1Z + f_1XU + p_1XZ + q_1UZ + s_1XUZ \\ C_2 &= a_2 + b_2X + c_2U + d_2Z + f_2XU + p_2XZ + q_2UZ + s_2XUZ \\ C_3 &= a_3 + b_3X + c_3U + d_3Z + f_3XU + p_3XZ + q_3UZ + s_3XUZ \end{aligned} \tag{43}$$

Для определения постоянных коэффициентов в каждой из этих функций необходим комплект из 9-ти эталонов (стандартных образцов) с различным сочетанием концентрации этих трех веществ.

Для определения коэффициентов в КФ для концентрации C_1 составим и решим систему уравнений.

$$\begin{aligned} C_{111} &= a_1 + b_1X_{111} + c_1U_{111} + d_1Z_{111} + f_1X_{111}U_{111} + p_1X_{111}Z_{111} + q_1U_{111}Z_{111} + s_1X_{111}U_{111}Z_{111} \\ C_{112} &= a_1 + b_1X_{112} + c_1U_{112} + d_1Z_{112} + f_1X_{112}U_{112} + p_1X_{112}Z_{112} + q_1U_{112}Z_{112} + s_1X_{112}U_{112}Z_{112} \\ C_{113} &= a_1 + b_1X_{113} + c_1U_{113} + d_1Z_{113} + f_1X_{113}U_{113} + p_1X_{113}Z_{113} + q_1U_{113}Z_{113} + s_1X_{113}U_{113}Z_{113} \\ C_{121} &= a_1 + b_1X_{121} + c_1U_{121} + d_1Z_{121} + f_1X_{121}U_{121} + p_1X_{121}Z_{121} + q_1U_{121}Z_{121} + s_1X_{121}U_{121}Z_{121} \\ C_{122} &= a_1 + b_1X_{122} + c_1U_{122} + d_1Z_{122} + f_1X_{122}U_{122} + p_1X_{122}Z_{122} + q_1U_{122}Z_{122} + s_1X_{122}U_{122}Z_{122} \end{aligned} \tag{44}$$

$C_{123}=a_1+b_1X_{123}+c_1U_{123}+d_1Z_{123}+f_1X_{133}U_{123}+p_1X_{123}Z_{123}+q_1U_{123}Z_{123}+s_1X_{123}U_{123}Z_{123}$

$C_{131}=a_1+b_1X_{131}+c_1U_{131}+d_1Z_{131}+f_1X_{131}U_{121}+p_1X_{131}Z_{131}+q_1U_{131}Z_{131}+s_1X_{131}U_{131}Z_{131}$

$C_{132}=a_1+b_1X_{132}+c_1U_{132}+d_1Z_{132}+f_1X_{132}U_{122}+p_1X_{132}Z_{132}+q_1U_{132}Z_{132}+s_1X_{132}U_{132}Z_{132}$

$C_{133}=a_1+b_1X_{133}+c_1U_{133}+d_1Z_{133}+f_1X_{133}U_{123}+p_1X_{133}Z_{133}+q_1U_{133}Z_{133}+s_1X_{133}U_{133}Z_{133}$

Для определения коэффициентов в КФ для концентрации C_2 составим и решим систему уравнений.

$C_{211}=a_2+b_2X_{111}+c_1U_{111}+d_2Z_{111}+f_2X_{111}U_{111}+p_2X_{111}Z_{111}+q_2U_{111}Z_{111}+s_2X_{111}U_{111}Z_{111}$

$C_{212}=a_2+b_2X_{112}+c_2U_{112}+d_2Z_{112}+f_2X_{112}U_{112}+p_2X_{112}Z_{112}+q_2U_{112}Z_{112}+s_2X_{112}U_{112}Z_{112}$

$C_{213}=a_2+b_2X_{113}+c_2U_{113}+d_2Z_{113}+f_2X_{113}U_{113}+p_2X_{113}Z_{113}+q_2U_{113}Z_{113}+s_2X_{113}U_{113}Z_{113}$

$C_{221}=a_2+b_2X_{121}+c_2U_{121}+d_2Z_{121}+f_2X_{121}U_{121}+p_2X_{121}Z_{121}+q_2U_{121}Z_{121}+s_2X_{121}U_{121}Z_{121}$ (45)

$C_{222}=a_2+b_2X_{122}+c_2U_{122}+d_2Z_{122}+f_2X_{122}U_{122}+p_2X_{122}Z_{122}+q_2U_{122}Z_{122}+s_2X_{122}U_{122}Z_{122}$

$C_{223}=a_2+b_2X_{123}+c_2U_{123}+d_2Z_{123}+f_2X_{133}U_{123}+p_2X_{123}Z_{123}+q_2U_{123}Z_{123}+s_2X_{123}U_{123}Z_{123}$

$C_{231}=a_2+b_2X_{131}+c_2U_{131}+d_2Z_{131}+f_2X_{131}U_{121}+p_2X_{131}Z_{131}+q_2U_{131}Z_{131}+s_2X_{131}U_{131}Z_{131}$

$C_{232}=a_2+b_2X_{132}+c_2U_{132}+d_2Z_{132}+f_2X_{132}U_{122}+p_2X_{132}Z_{132}+q_2U_{132}Z_{132}+s_2X_{132}U_{132}Z_{132}$

$C_{233}=a_2+b_2X_{133}+c_2U_{133}+d_2Z_{133}+f_2X_{133}U_{123}+p_2X_{133}Z_{133}+q_2U_{133}Z_{133}+s_2X_{133}U_{133}Z_{133}$

Аналогично составим и решим систему уравнений для определения коэффициентов в КФ для концентрации C_3.

Вопросы для самопроверки по первой главе

1 Что является предметом науки об измерениях?
2 Как формулируется определение понятия *физическая величина*?
3 Какие определения понятия *измерение* Вы знаете?
4 Каковы основные постулаты метрологии?
5 Какие параметры входят в *основное уравнение измерений*?
6 Каковы основные аспекты *измерительного процесса*?
7 Почему возникла необходимость в единых *единицах величин*?
8 Какие основные единицы величин в *Международной системе SI*?
9 В чем разница между величиной и измеряемой величиной?
10 К какой погрешности относится *неадекватность модели объекта реальному объекту* и почему?
11 В чем разница понятий *истинное* и *измеренное* значение величины?
12 В чем отличие понятий *погрешность* и *неопределенность* измерений?
13 Когда возможно использование понятия *истинное значение поправки*?
14 Какие виды поправок Вы знаете, и как находят их оцененные значения?
15 Как нормируют случайную погрешность?
16 Как оценивают случайную погрешность многократных измерений?
17 Для каких целей нужен анализ *методических погрешностей измерений*?
18 Каковы источники инструментальной погрешности измерений?
19 В чем отличие систематической и случайной погрешности измерений?
20 Когда и как используют распределение Стьюдента?
21 Как выглядит модель погрешности измерений?
22 Как суммируются составляющие погрешности измерений?
23 Какова блок-схема получения результата прямых измерений?
24 Что принимают за *результат измерений*?
25 Какую погрешность эталона нельзя исключить и почему?
26 Является ли "каротаж" измерительным процессом и почему?
27 К каким видам средств измерений относится скважинная аппаратура?
28 В чем отличие основной погрешности от дополнительной?
29 Какие нормируемые характеристики основной погрешности Вы знаете?
30 Когда нормируют граничные функции влияния?
31 Что нормируют вместе с номинальной функцией влияния?
32 Чем отличаются понятия *градуировка*, *калибровка* и *поверка*?
33 Каким показателем характеризуется понятие *правильность МВИ*?
34 Какими показателями характеризуется понятие *прецизионность МВИ*?
35 Каковы особенности измерений в неоднородных средах?
36 От чего зависит кажущееся значение величины?
37 Каковы источники методической погрешности?
38 Для каких целей оценивают методические погрешности?
39 Как определить инструментальную погрешность скважинной аппаратуры по ее нормируемым МХ?
40 Как измерить концентрацию 2-х и 3-х компонентов?

Глава II
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

8 Метрологическое обслуживание и прослеживаемость

8.1 Метрологическая деятельность геофизической компании

Данная глава посвящена метрологическому обслуживанию измерений – подготовке СИ к будущим измерениям, включая получение СИ единицы величины от эталона и последующее её хранение в виде шкалы и поправок к отметкам шкалы.

Измерение невозможно, если СИ не передана необходимая единица величины. Слова "единица" и "единство" имеют один и тот же корень.

Существует особая самостоятельная область человеческой деятельности, связанная с использованием эталонов, – **метрологическая деятельность** (метрологический сервис), включающая воспроизведение единиц величин эталонами, калибровку, поверку средств измерений и аттестацию МИ.

Воспроизведение единицы величины первичным эталоном – это самый ответственный и престижный для любой страны этап метрологической деятельности в обеспечении единства измерений.

Передача хранимой эталоном единицы физической величины рабочему СИ или другому эталону осуществляется путем его калибровки. Другая метрологическая операции – поверка выполняется для контроля стабильности хранимой прибором единицы величины во времени.

Измерительные операции с участием эталонов отличаются от обычных измерений тем, что СИ, уже хранящим единицу, *измеряются заведомо известные значения величины*, воспроизводимые эталоном. При первичной передаче единицы величины на хранение от эталона СИ как бы проводится измерительный эксперимент – ***физическое моделирование*** будущего измерительного процесса для установления связи между измеряемой величиной и показаниями.

Для СИ, уже хранящего переданную единицу, моделирование измерений с использованием эталона осуществляется для выявления поправок к его показаниям, чтобы повысить точность будущих измерений или принять решение о его годности для измерений с нормированными МХ. На международном уровне сличение первичного национального эталона страны с международным прототипом единицы той же величины выполняют с целью определения поправки.

Можно сказать, что единица величины передается от эталона другому СИ для хранения при моделировании измерений, а используется эта хранимая СИ единица непосредственно при выполнении измерений.

Отличительные особенности метрологической деятельности (моделирования измерений) от измерительной деятельности (собственно самих измерений) приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Отличительные особенности метрологической деятельности от измерительной деятельности

Отличительный признак	***Метрологическая деятельность***	Измерительная деятельность
Использование эталона	Используется	Не используется
Воспроизведение, передача и хранение единицы величины	Воспроизводится и передается СИ	Хранится СИ
Значение измеряемой величины до измерений	Известно	Неизвестно
Определение и использование поправки	Определяется в процессе калибровки и сравнивается с нормированным значением при поверке	Используются для коррекции измеренного значения. Превращается в погрешность, если не используется для коррекции.
Источники погрешности измерений в нормальных и рабочих условиях	Несовершенство эталона и передачи единицы в нормальных условиях измерений	Несовершенство СИ и эталона в нормальных условиях и реакция СИ на изменение условий измерений

Часто в метрологической деятельности (калибровка или поверка СИ, аттестация МВИ, оценка компетентности лаборатории, сравне-

ние лабораторий между собой) возникает необходимость *сравнения измеренного значения величины* с каким-либо известным опорным (принятым по соглашению) значением: эталонным (действительным или условно истинным) значением; референтным значением.

Оцененная близость измеренного значения к известному опорному значению называется правильностью измерений. Показателем правильности измерений является ***поправка***, которая алгебраически добавляется к измеренному значению. Слова "*правильность*" и "*поправка*" имеют один и тот же корень "*прав*".

Если при вычислении поправки использовано опорное значение с известной погрешностью, то поправке приписывается погрешность опорного значения. Если при калибровке СИ, хранящего единицу, переданную в нормальных условиях, в качестве опорного значения используют "*эталонное значение*" ($X_{эн}$), воспроизводимое в нормальных условиях с погрешностью $\pm\Delta_{эн}$, то поправку к показаниям в нормальных условиях определяют по формуле

$$\theta_{н} \pm \Delta_{эн} = (X_{эн} \pm \Delta_{эн}) - X_{измн}. \qquad (46)$$

Если при калибровке СИ, хранящего единицу, в качестве опорного значения используют значение ($X_{измн}$), измеренное в нормальных условиях, то поправку к его показаниям в рабочих условиях определяют по формуле (14).

Полная модель поправки предусматривает ее изменение во времени. Поэтому требуется периодическая поверка СИ. Если не предусмотрено введение поправок, то при поверке полученная поправка преобразуется в погрешность и сравнивается с нормой. Чем меньше поправка, тем выше правильность измерений. Если предусмотрено введение поправок, то при поверке оценивают их погрешность.

Таким образом, метрологическая деятельность (метрологический сервис) в каждой стране занимает важное место в обеспечении жизнедеятельности ее народа. Её осуществляет метрологическая служба страны через калибровку и поверку СИ, а также метрологическую аттестацию МИ.

8.2 Эталоны единиц геофизических величин

Воспроизведение единицы (величины) – совокупность операций по материализации единицы величины с помощью первичного этало-

на. Рассматривают три процедуры воспроизведения единицы величины.

Первая состоит в физической реализации единицы измерения в соответствии с ее определением (воспроизведение в буквальном смысле, например секунда).

Вторая процедура состоит в использовании высокостабильного эталона, основанного на физическом явлении. Например, в случае использования стабилизированных по частоте лазеров при воспроизведении метра, эффекта Джозефсона – для воспроизведения вольта, квантового эффекта Холла – для Ома.

Третья процедура состоит в принятии материальной меры в качестве эталона, например, эталон массы 1 кг в виде гири.

Реализация определения физической величины может обеспечиваться средством измерений, материальной мерой или стандартным образцом.

Воспроизведение единиц геофизических величин может выполняться комплексом измерительных операций посредством *стандартных образцов* (СО) состава и свойств горных пород. СО горных пород, пересеченных скважиной, широко распространены в системе обеспечения единства геофизических измерений. Обычно такие СО располагаются на втором сверху поле соответствующей *поверочной схемы*.

Единство измерений в стране обеспечивается использованием первичных государственных эталонов. Они воспроизводят единицы физических величин с наименьшими для данной страны погрешностями. Государственные эталоны хранятся в метрологических институтах Агентства по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации (Росстандарта). Институты обеспечивают передачу размеров единиц физических величин от первичного эталона другим эталонам и рабочим СИ.

Эталоном единицы величины называется средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений.

Эталон выполняется по особой спецификации и официально утверждается в качестве эталона. Эталон должен обладать тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью; воспроизводимостью; сличаемостью.

Неизменность предполагает, что эталоны по своему принципу действия и устройству не претерпевают изменений и способны удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени (стабильность).

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники.

Сличаемость – возможность обеспечения сличения с другими эталонами или другими СИ, нижестоящими по поверочной схеме.

Сличением называется совокупность операций, устанавливающих соотношение между единицами величин, воспроизводимых эталонами единиц величин одного уровня точности и в одинаковых условиях.

Естественный эталон – эталон, основанный на присущих и воспроизводимых свойствах материального объекта или явления.
Например, ячейка тройной точки воды как естественный эталон термодинамической температуры, эталон разности электрических потенциалов, основанный на эффекте Джозефсона, эталон электрического сопротивления, основанный на квантовом эффекте Холла.

Значение величины естественного эталона приписывается по соглашению и не требует установления связи с другими эталонами того же вида. Показатели точности определяются с учетом двух составляющих: первая связана с согласованным значением величины, вторая связана с конструкцией, исполнением и хранением эталона. Естественные эталоны, которые основаны на квантовых явлениях, обычно имеют наивысшую стабильность.

Иногда используемый при калибровке и поверке геофизической аппаратуры эталон называют ***калибратором***.

Метрологические характеристики эталона аналогичны метрологическим характеристикам средств измерений (например, показатели точности и стабильности).

Совокупность операций, необходимых для обеспечения выполнения обязательных метрологических и технических требований к эталонам, относят к понятию "*содержание (хранение) эталона*". Хранение эталона включает его регулярные исследования, в том числе сличения с национальными эталонами других стран, калибровку или поверку с целью подтверждения выполнения обязательных требований к метрологическим характеристикам и совершенствования мето-

дов передачи единицы или шкалы измерений. Для руководства работами по содержанию эталонов назначают ***ученых – хранителей государственных эталонов***, выбираемых из числа ведущих в данной области специалистов-метрологов.

В России в области механики созданы и используются 38 эталонов, в том числе первичные эталоны метра, килограмма и секунды, точность которых имеет чрезвычайно большое значение, поскольку эти единицы участвуют в образовании производных единиц большинства научных направлений.

Эталоны делятся на первичные и вторичные.

Первичный эталон – эталон, основанный на использовании первичной референтной методики измерений или созданный как артефакт, выбранный по соглашению. Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы или шкалы измерений с наивысшей точностью. Метрологические свойства первичных эталонов единиц величин устанавливают независимо от других эталонов единиц этих же величин. Для первичного эталона, воспроизводящего единицу в специфических условиях (высокие и сверхвысокие частоты, малые и большие энергии, давления, температуры, особые состояния вещества и т.п.) используют термин ***первичный специальный эталон***.

Вторичный эталон – эталон, получающий единицу величины или шкалу измерений непосредственно от первичного эталона данной единицы или шкалы.

Эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в стране или группе стран, в регионе, министерстве (ведомстве), организации, предприятии или лаборатории), передающий единицу величины или шкалу измерений подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений называют ***исходным эталоном***.

Эталоны, стоящие в поверочной схеме (калибровочной иерархии) ниже исходного эталона, называют ***подчиненными эталонами***.

Различают государственные (первичные и специальные) и рабочие эталоны.

Государственный первичный эталон – эталон единицы величины, обеспечивающий воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей точностью, утверждаемый и применяемый в качестве исходного эталона на территории РФ. Первичные эталоны представляют собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники. Они со-

ставляют основу государственной системы обеспечения единства измерений. Государственный эталон – эталон, находящийся в федеральной собственности.

Специальный эталон обеспечивает воспроизведение единицы в особых условиях. Требуется измерять не только неизменные во времени величины, но и изменяющиеся (в частности, периодические или импульсные сигналы в широкой полосе частот). Условия измерений (давление в среде, ее температура и т.п.) могут сильно отличаться от обычных. Вещество может существовать в различных фазах (твердой, жидкой и газообразной). В указанных условиях прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью не осуществима. *Специальный эталон служит для этих условий первичным эталоном*.

Государственный первичный или специальный эталоны официально утверждаются Правительством РФ в качестве исходного для страны. Состав эталона устанавливается при его разработке, а его показатели точности должны соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники.

Первичные государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран.

Погрешности государственных первичных и специальных эталонов характеризуются систематической погрешностью, случайной погрешностью и нестабильностью.

Систематическая погрешность описывается интервалом, в котором она находится с заданной вероятностью.

Случайная погрешность выражается средним квадратическим отклонением (СКО) воспроизводимого размера единицы величины с указанием числа независимых измерений.

Нестабильность эталона задается изменением размера единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, за определенный промежуток времени.

Первичные государственные эталоны единиц геофизических величин (коэффициентов пористости, проницаемости, нефтенасыщенности и т.п.) в России отсутствуют.

Рабочий эталон – эталон, предназначенный для передачи единицы величины или шкалы измерений средствам измерений. Рабочие эталоны создают в случае необходимости организации поверочных работ и предохранения первичного государственного эталона от из-

лишнего износа. Это самые распространенные эталоны. В зависимости от точности их подразделяют на разряды. Разряды нумеруются, начиная с самого точного эталона, – 1-й, 2-й и т.д. Каждый разряд соответствует одной из ступеней поверочной схемы. В этом случае передачу единицы осуществляют через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке единицу передают средству измерений.

Национальный эталон – эталон, признанный национальными органами власти для использования в государстве или экономике в качестве исходного для страны.

Международный эталон – эталон, который признан всеми государствами, подписавшими международное соглашение, и предназначен для всего мира.

Эталон сравнения – эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

8.3 Прослеживаемость единиц и ее подтверждение

Метрологическая сопоставимость результатов измерений однородных величин базируется на их метрологической прослеживаемости к одной и той же основе для сравнения. Метрологическая совместимость результатов измерений заменяет традиционное понятие *нахождение в пределах погрешности*, т. к. она дает критерий для заключения, относятся ли два результата измерений к одной и той же измеряемой величине или нет. Если в серии измерений величины, которая предполагается постоянной, результат измерения несовместим с остальными, это означает, что или оценка точности измерения некорректна, или измеряемая величина изменилась за промежуток времени между измерениями.

Слово "прослеживаемость" происходит от слова "след". Например, необходимо проследить происхождение единицы величины.

Метрологическая прослеживаемость – "*свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений*" [22, 35].

В этом определении "основой для сравнения" может быть определение единицы величины через ее практическую реализацию, или методика измерений, или эталон.

Если при калибровке СИ в качестве основы для сравнения принят эталон, то сертификатом о калибровке документируются все сведения об этом эталоне, включая воспроизводимое значение величины, погрешность и сведения о «Сертификате калибровки», в котором содержится информация о переданной ему единице.

Если основой для сравнения является определение единицы величины, то говорят о *метрологической прослеживаемости к единице*.

Описание основы для сравнения должно включать время, в которое она была использована в данной калибровочной иерархии, вместе с любой другой существенной метрологической информацией, например, о том, когда была выполнена первая калибровка в калибровочной иерархии.

Для косвенных измерений каждое из значений входных величин должно быть само метрологически прослеживаемо, а калибровочная иерархия может иметь форму разветвленной структуры или сети.

Метрологическая прослеживаемость результата измерений не гарантирует, что показатель точности (неопределенности) соответствует заданной цели или что отсутствуют ошибки.

Сличение между двумя эталонами может рассматриваться как калибровка, если это сличение используется для поверки и, при необходимости, для корректировки значения величины, показателей точности (неопределенности) измерений, приписываемых одному из эталонов.

Для подтверждения метрологической прослеживаемости рассматриваются следующие элементы:

- непрерывная цепь метрологической прослеживаемости к международным или национальным эталонам;
- документированная неопределенность измерений;
- аккредитация на техническую компетентность;
- метрологическая прослеживаемость к системе SI;
- интервалы между калибровками.

Цепь метрологической прослеживаемости – последовательность эталонов и калибровок (поверок), которые используются для соотнесения результата измерения с основой для сравнения.

Метрологическая прослеживаемость требует наличия установленной калибровочной иерархии и (или) поверочной схемы.

8.4 Передача единиц величин геофизическим приборам

Передача единицы величины – приведение размера величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой или хранимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

Передача шкалы – совокупность операций, имеющих целью воссоздание шкалы измерений (или ее участка) в соответствии с ее спецификацией.

Система передачи размеров единиц физических величин от первичных государственных эталонов России к рабочим СИ регламентирована стандартами на поверочные схемы, содержащие поля средств измерений и ступени методов передачи размеров единиц. Размер единицы передается "сверху вниз" – от более точных СИ к менее точным СИ.

Поверочная схема – иерархическая структура, устанавливающая соподчинение эталонов, участвующих в передаче единицы или шкалы измерений от исходного эталона средствам измерений (с указанием методов и погрешностей при передаче), утверждаемая в установленном порядке в виде нормативного документа.

На полях такой схемы отражены сведения о средствах измерений, на ступенях – о методах и погрешности измерений при передаче единицы.

Элементами калибровочной иерархии являются один или более эталонов и средств измерений.

Поверочные схемы могут создаваться на государственном уровне и на уровне организации.

Государственная поверочная схема содержит на верхнем поле государственный первичный эталон единицы величины и распространяется на все СИ данной величины, входящие в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений. Она разрабатывается в виде нормативного документа, состоящего из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу. Если измерения выполняются вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений, то создается поверочн-

ная схема в виде нормативного документа организации (предприятия).

Поверочную схему для геофизических средств измерений также оформляют в виде чертежа, на котором указывают: наименования средств измерений и методов поверки; номинальные значения физической величины или их диапазоны; допускаемую погрешность средств измерений и методов поверки. На верхнем поле схемы располагаются СИ, единицы измеряемых величин которых прослеживаются к государственным эталонам России.

На втором поле сверху располагаются исходные эталоны для скважинной аппаратуры. Чаще всего это исходные стандартные образцы состава и свойств пластов горных пород, пересеченных скважиной (модели пластов).

На третьем поле сверху располагаются эталоны второго порядка для скважинной аппаратуры. Чаще всего это рабочие стандартные образцы состава и свойств горных пород, пересеченных скважиной, принадлежащие научным организациям и производственным геофизическим предприятиям. Здесь же расположены полевые калибраторы в виде имитаторов измеряемых физических величин, предназначенные для периодической поверки скважинной аппаратуры путем контроля стабильности параметров ее КФ через определенные промежутки времени. Иногда для этих целей используются контрольные скважины, если стабильность воспроизводимых ими параметров документально подтверждена.

На нижнем поле поверочной схемы располагаются рабочая скважинная геофизическая измерительная техника, для которой регламентированы нормированные характеристики основной погрешности в условиях, принятых за нормальные.

Неопределенность измерений неизбежно возрастает с увеличением числа калибровок при передаче единицы величины по ступеням поверочной схемы.

Основой для сравнения в калибровочной иерархии может быть определение единицы величины через ее практическую реализацию, или референтная методика измерений, или эталон.

В некоторых странах поверочные схемы не регламентированы и не используются.

9 Калибровка геофизических средств измерений

В данном разделе рассматриваются те МХ геофизических СИ, которые необходимы для получения измеренного значения параметра пласта или скважины. Калибровка геофизических СИ связана с получением единицы измеряемой величины от эталона и дальнейшего ее хранения для выполнения будущих измерений.

9.1 Шкалы и калибровочные функции (*КФ*)

Единица измеряемой величины может быть сохранена отметками шкалы или параметрами КФ, связывающей показания СИ с измеряемой величиной.

Если КФ не несет информации о показателях точности ее построения, то она не может быть использована для представления результата измерения. С КФ связана погрешность калибровки (погрешность эталона), представляемая в виде таблицы или функции. Стабильность КФ во времени выполняют периодической поверкой СИ.

Диаграмма калибровки – графическое выражение соотношения между показанием СИ и соответствующим эталонным значением величины с полосой погрешности. Она соответствует отношению "*один-множество*", а ширина полосы для данного показания отражает *инструментальную погрешность*.

Значительная часть скважинной геофизической аппаратуры относится к индивидуально градуируемым СИ.

Градуировкой измерительного преобразователя называют совокупность операций, выполняемых с целью передачи ему единицы физической величины путем оцифровки шкалы прибора или установления параметров КФ. Следует заметить, что в Законе № 102-ФЗ термин "*градуировка*" не упоминается. Эту операцию будем рассматривать как *составную часть калибровки* (см. рисунок 14), в результате которой определяются действительные значения параметров индивидуальной КФ.

Градуировочной характеристикой называется зависимость выходного сигнала x СИ от измеряемого параметра (измеряемой величины) $B_{изм}$, то есть $x=f(B_{изм})$. Обычно это зависимость между выходным сигналом и эталонным значением измеряемого параметра.

В большинстве случаев в геофизике применяется обратная характеристика, представляющая собой зависимость измеряемого параметра от выходного сигнала аппаратуры, то есть $B_{изм}=F(x)$. Такая характеристика, представленная формулой, называется ***калибровочной функцией***. Она очень удобна для непосредственного вычисления измеренного значения параметра пласта или скважины по показаниям геофизической аппаратуры.

КФ может быть номинальной (одинаковой для всей совокупности однотипных измерительных преобразователей) или индивидуальной (различной для каждого экземпляра однотипной аппаратуры). Аппаратура электрического и акустического каротажа, инклинометры и каверномеры имеют номинальные КФ. Для аппаратуры интегрального гамма-каротажа, нейтронного каротажа, плотностного гамма-гамма-каротажа, для скважинных термометров, манометров и расходомеров обычно строится индивидуальная КФ.

При калибровке всегда оцениваются погрешности построенной КФ, включающие погрешности применяемых эталонов и погрешности аппроксимации реальной КФ. КФ может быть линейной или нелинейной функцией одной переменной. КФ в виде функции двух и более переменных называется ***калибровочно-поправочной функцией*** (КПФ).

Если линейная КФ проходит через ноль (начало декартовых координат), то в документации указывается только один коэффициент преобразования. Если она не проходит через ноль, то указывают формулу $Y=a+вx$**,** описывающую КФ двумя коэффициентами a и $в$**,** где x - выходной сигнал измерительного канала скважинной аппаратуры.

Если характеристика нелинейная, то чаще всего указывают функцию преобразования в виде полинома второй степени $Y=a+вx+cx^2$ (с тремя коэффициентами). Полином более высокой степени не используется, так как степень кривизны функции обычно невелика. Реже используется *степенная* и *логарифмическая* КФ.

При определении коэффициентов КФ составляется система уравнений, в каждом из которых неизвестными являются сами вычисляемые коэффициенты для каждой пары "*измеряемый параметр - выходной сигнал*". Номинальную или индивидуальную КФ аппаратуры представляют в виде формулы, графика или таблицы.

Координаты каждой экспериментальной точки, принятой для построения КФ, являются случайными величинами. Поэтому принятая для аппаратуры КФ является частной реализацией совокупности случайных реализаций КФ, отличающихся от идеальной КФ этой аппаратуры.

Возможны два варианта расположения принятой КФ аппаратуры относительно экспериментальных точек:

1) проходит строго через экспериментальные точки;

2) проходит между экспериментальными точками, не совпадая ни с одной из них.

В первом случае количество пар экспериментальных данных равно числу неизвестных параметров КФ.

Для второго варианта число пар экспериментальных данных больше числа неизвестных коэффициентов КФ. В этом случае система уравнений не имеет однозначного решения и решается одним из статистических методов – методом наименьших квадратов (МНК).

Рассмотрим эти два метода построения КФ для трех видов функций, наиболее часто встречающихся в геофизике - линейной, параболической и логарифмической.

9.2 Способы построения линейной КФ вида $Y = a + b \cdot X$

Алгебраический способ

Исходные данные: эталон воспроизводит только два значения измеряемой величины $Y_{1э} \pm \Delta_{ор1э}$ и $Y_{2э} \pm \Delta_{ор2э}$; им соответствуют два измеренных значения выходного сигнала калибруемой аппаратуры $X_1 \pm \Delta_{ор1}$ и $X_2 \pm \Delta_{ор2}$.

На основании таких исходных данных может быть составлена система двух линейных уравнений с двумя неизвестными a и b в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y_{1э} &= a + b \cdot X_1 \\ Y_{2э} &= a + b \cdot X_2 \,. \end{aligned} \qquad (47)$$

Эта система имеет однозначное решение:

$$a = \frac{Y_{1э}X_2 - Y_{2э}X_1}{X_2 - X_1}$$

$$b = \frac{Y_{2э} - Y_{1э}}{X_2 - X_1} \qquad (48)$$

За оценку абсолютной погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимается максимальная из абсолютных погрешностей эталонов (либо $\pm\Delta_{op э1}$, либо $\pm\Delta_{op э2}$), когда погрешностью измерений параметров выходного сигнала можно пренебречь. При этом должны выполняются неравенства:

$$\frac{\Delta_{op1}}{X_1} \le 0{,}3 \cdot \frac{\Delta_{op1э}}{Y_{1э}} \text{ и } \frac{\Delta_{op2}}{X_2} \le 0{,}3 \cdot \frac{\Delta_{op2э}}{Y_{2э}}. \qquad (49)$$

Если погрешностью измерений параметра выходного сигнала пренебречь нельзя, то за оценку абсолютной погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимается максимальное из следующих значений:

$$\pm Y_{1э} \cdot \sqrt{\frac{\Delta^2_{op1э}}{Y^2_{1э}} + \frac{\Delta^2_{op1}}{X^2_1}} \text{ или } \pm Y_{2э} \cdot \sqrt{\frac{\Delta^2_{op2э}}{Y^2_{2э}} + \frac{\Delta^2_{op2}}{X^2_2}}. \qquad (50)$$

Частным случаем первого варианта построения линейной КФ является случай, когда функция проходит через начало координат. Такое возможно, когда по принципу действия или благодаря схемным решениям аппаратуры при нулевом значении измеряемого параметра выходной сигнал аппаратуры равен нулю. Эталон, например полевой калибратор, воспроизводит только одно значение измеряемого параметра $Y_{1э}$, которому соответствует только одно значение выходного сигнала градуируемой аппаратуры X_1. В итоге имеем одно линейное уравнение с одним неизвестным в следующем виде: $Y_{1э}=bX_1$, решение которого очевидно.

За оценку абсолютной погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимаются погрешности эталона ($\pm\Delta_{op э1}$), если погрешностью измерений параметров выходного сигнала можно пренебречь, то есть выполняется первое неравенство (45). Если погрешностью измерений параметров выходного сигнала пренебречь нельзя, то за оценку абсолютной погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимается:

$$\pm Y_1 \cdot \sqrt{\frac{\Delta^2_{op1э}}{Y^2_1} + \frac{\Delta^2_{op1}}{X^2_1}}. \qquad (51)$$

Статистический способ

Исходные данные: эталон воспроизводит более двух значений измеряемого параметра, например, для n значений $Y_{1э} \pm \Delta_{ор1э}$, $Y_{2э} \pm \Delta_{ор2э}$, … и $Y_{nэ} \pm \Delta_{орnэ}$; им соответствуют n измеренных значений выходного сигнала калибруемой аппаратуры $X_1 \pm \Delta_{ор1}$, $X_2 \pm \Delta_{ор2}$, … и $X_n \pm \Delta_{орn}$.

На основании таких исходных данных может быть составлена система n линейных уравнений с двумя неизвестными a и b в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a + b \cdot X_1 \\ Y_2 &= a + b \cdot X_2 \\ &\ldots \\ Y_n &= a + b \cdot X_n. \end{aligned} \qquad (52)$$

Эта система решается методом наименьших квадратов, предложенным Гауссом. Из неё составляют систему из двух нормальных уравнений с двумя неизвестными a и b. Нормальные уравнения получают по следующему правилу.

Первое нормальное уравнение получим в результате суммирования левой и правой частей системы (48), а второе в результате суммирования левой и правой частей этой системы после умножения каждого уравнения на коэффициент при неизвестном b. В итоге получим следующую новую систему уравнений

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \\ &\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot Y_{iэ} = a \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i + b \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 . \end{aligned} \qquad (53)$$

Решение данной системы нормальных уравнений найдём путём подстановки a из первого уравнения во второе, вычислим b и найдем a, подставив b в первое уравнение.

$$b = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot Y_{iэ} - \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} Y_{iэ}}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} X_i)^2} \quad ; \qquad (54)$$

$$a = \frac{1}{n} \cdot (\sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} - b \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i) = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} - \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot Y_{iэ} \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} X_i)^2}.$$

Частным случаем второго варианта построения линейной КФ является случай, когда функция проходит через начало координат, $a = 0$.

В этом случае поиск коэффициента b методом наименьших квадратов сводится к нахождению среднего арифметического значения всех коэффициентов преобразования в каждой точке контроля аппаратуры:

$$b = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{Y_{iэ}}{X_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_{iэ}}{\sum_{i=1}^{n} X_i}. \qquad (55)$$

Для оценки погрешности градуировки СИ необходимо найти отклонения экспериментальных точек от построенной КФ с коэффициентами a и b. Для этого в каждой i-й точке контроля необходимо по построенной КФ определить измеренное значение $Y_{i\text{-}изм,}$ при выходном сигнале X_i. Затем в каждой i-й точке контроля вычислить оценку поправки по формуле

$$\theta_i = Y_{iэ} - Y_{i-изм}. \qquad (56)$$

Для каждой точки контроля абсолютную погрешность Δ_i найдем как алгебраическую сумму модуля оценки поправки и модуля нормированной погрешности ***i***-го эталона $|\Delta_{ориэ}|$:

$$\Delta_i = \pm(|\theta_i| + |\Delta_{ориэ}|) \qquad (57)$$

и либо выберем максимальную из них, либо построим зависимость оценки погрешности от измеряемого параметра.

Если погрешностью измерений параметров выходного сигнала пренебречь нельзя, то за оценку абсолютной погрешности аппаратуры принимается максимальное значение, вычисленное во всех точках контроля с использованием вновь построенной КФ:

$$\tilde{\Delta} = \pm\left(\left|\tilde{\theta}_i\right| + Y_{iэ} \cdot \sqrt{\frac{\Delta^2_{opiэ}}{Y^2_{iэ}} + \frac{\Delta^2_{op}}{X_i^2}}\right)_{\max}. \qquad (58)$$

9.3 Способы построения параболической КФ вида $Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2$

Алгебраический способ

Исходные данные: эталон воспроизводит только три значения измеряемого параметра $Y_{1э} \pm \Delta_{op1э}$, $Y_{2э} \pm \Delta_{op2э}$ и $Y_{3э} \pm \Delta_{op3э}$; им соответствуют три измеренных значения выходного сигнала градуируемой аппаратуры $X_1 \pm \Delta_{op1}$, $X_2 \pm \Delta_{op2}$ и $X_3 \pm \Delta_{op3}$.

На основании таких исходных данных может быть составлена система трёх линейных уравнений с тремя неизвестными *a*,*b* и *c* в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y_{1э} &= a + b \cdot X_1 + c \cdot X_1^2 \\ Y_{2э} &= a + b \cdot X_2 + c \cdot X_2^2 \\ Y_{3э} &= a + b \cdot X_3 + c \cdot X_3^2. \end{aligned} \qquad (59)$$

Эта система имеет однозначное алгебраическое решение:

$$\begin{aligned} c &= \frac{Y_{3э} - Y_{2э} - (Y_{2э} - Y_{э1}) \cdot (X_3 - X_2)/(X_2 - X_1)}{(X_3 - X_1) \cdot (X_3 - X_2)}; \\ b &= \frac{Y_{2э} - Y_{1э}}{X_2 - X_1} - (X_2 + X_1) \cdot c; \\ a &= Y_{3э} - b \cdot X_3 - c \cdot X_3^2. \end{aligned} \qquad (60)$$

За оценку абсолютной погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимается максимальное из нормированных пределов абсолютной погрешности эталонов (либо $\Delta_{op1э}$, либо $\Delta_{op2э}$, либо $\Delta_{op3э}$).

Если погрешностью измерений параметров выходного сигнала пренебречь нельзя, то за оценку абсолютной погрешности аппаратуры принимается максимальное из следующих значений:

$$\pm Y_1 \cdot \sqrt{\frac{\Delta_{op1э}^2}{Y_1^2} + \frac{\Delta_{op}^2}{X_1^2}} \text{ или } \pm Y_2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta_{op2э}^2}{Y_2^2} + \frac{\Delta_{op}^2}{X_2^2}} \text{ или } \pm Y_3 \cdot \sqrt{\frac{\Delta_{op3э}^2}{Y_3^2} + \frac{\Delta_{op}^2}{X_3^2}}.$$

Статистический способ

Исходные данные: эталон воспроизводит более трёх значений измеряемого параметра, например, для *n* значений $Y_{1э} \pm \Delta_{op1э}$, $Y_{2э} \pm \Delta_{op2э}$, … и $Y_{nэ} \pm \Delta_{opnэ}$; им соответствуют *n* измеренных значений выходного сигнала калибруемой аппаратуры $X_1 \pm \Delta_{op1}$, $X_2 \pm \Delta_{op2}$, … и $X_n \pm \Delta_{opn}$.

На основании таких исходных данных может быть составлена система n линейных уравнений с тремя неизвестными *a*,*b* и *c* в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y_{1э} &= a + b \cdot X_1 + c \cdot X_1^2 \\ Y_{2э} &= a + b \cdot X_2 + c \cdot X_2^2 \\ Y_{3э} &= a + b \cdot X_3 + c \cdot X_3^2 \\ &\dots \\ Y_{nэ} &= a + b \cdot X_n + c \cdot X_n^2. \end{aligned} \qquad (61)$$

Эта система уравнений решается на основе метода наименьших квадратов. Из нее составляют систему из трех нормальных уравнений с тремя неизвестными *a*, *b* и *c*.

Нормальные уравнения получают по следующему правилу.

Первое нормальное уравнение получим в результате суммирования левой и правой частей системы (61) с последующим умножением обеих частей на сумму квадратов всех измеренных значений выходного сигнала *X*.

Второе уравнение получим в результате суммирования левой и правой частей этой системы после умножения каждого уравнения на

коэффициент при неизвестном b с последующим умножением обеих частей на сумму всех измеренных значений выходного сигнала X.

Третье уравнение получим в результате суммирования левой и правой частей этой системы после умножения каждого уравнения на коэффициент при неизвестном c.

В итоге получим следующую новую систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 = n \cdot a \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 + c \cdot (\sum_{i=1}^{n} X_i^2)^2 ; \\
&\sum_{i=1}^{n} (Y_{iэ} \cdot X_i) \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i = a \cdot (\sum_{i=1}^{n} X_i)^2 + b \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \sum_{i=1}^{n} X_i^3 ; \qquad (62) \\
&\sum_{i=1}^{n} (Y_{iэ} \cdot X_i^2) = a \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^4 .
\end{aligned}$$

В результате ее решения найдем коэффициенты a, b и c параболической КФ $Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2$, вычисляемые по формулам:

$$a = \frac{A1+A2+A3}{D1-D2}; \quad b = \frac{B1+B2+B3}{D1-D2}; \quad c = \frac{C1+C2+C3}{D1-D2}; \qquad (63)$$

$$\begin{aligned}
A1 &= \sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^4 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^3 \right)^2 \right); \\
A2 &= \sum_{i=1}^{n} (X_i \cdot Y_{iэ}) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3 - \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^4 \right); \\
A3 &= \sum_{i=1}^{n} (X_i^2 \cdot Y_{iэ}) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^2 \right)^2 \right); \\
B1 &= \sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3 - \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^4 \right); \\
B2 &= \sum_{i=1}^{n} (X_i \cdot Y_{iэ}) \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^4 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^2 \right)^2 \right);
\end{aligned}$$

$$B3 = \sum_{i=1}^{n}(X_i^2 \cdot Y_{iэ}) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3\right);$$

$$C1 = \sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^2\right)^2\right);$$

$$C2 = \sum_{i=1}^{n}(X_i \cdot Y_{iэ}) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3\right);$$

$$C3 = \sum_{i=1}^{n}(X_i^2 \cdot Y_{iэ}) \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2\right);$$

$$D1 = n \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^4 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^3;$$

$$D2 = \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^2\right)^3 + n \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} X_i^3\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i^4.$$

Если полученные коэффициенты *a,b* и *c* подставить в исходную систему (61), то получим совокупность измеренных значений $Y_{1изм}$, $Y_{2изм}$, $Y_{3изм}$…и $Y_{n\text{-}изм}$ при тех же самых значениях выходных сигналов. Для каждого из них найдем оценку поправки по формуле (56).

В каждой точке контроля найдем оценку абсолютной погрешности как сумму модуля полученной оценки поправки и модуля нормированной абсолютной погрешности эталона по формуле (57) и в качестве абсолютной погрешности аппаратуры выберем максимальную из них или построим зависимость оценки погрешности от измеряемого параметра.

Если погрешностью измерений параметров выходного сигнала пренебречь нельзя, то за оценку абсолютной погрешности аппаратуры принимается максимальное значение, вычисленное во всех точках контроля по формуле (58).

Следует отметить, что количество эталонов, применяемых для калибровки геофизических средств измерений, редко может быть выше четырех или пяти. Следовательно, в системе (61) будет такое же количество уравнений соответственно.

9.4 Способы построения логарифмической КФ вида $Y = a + b \cdot \ln(X)$

Алгебраический способ

Исходные данные: эталон воспроизводит только два значения измеряемого параметра $Y_{1э} \pm \Delta_{ор1э}$ и $Y_{2э} \pm \Delta_{ор2э}$; им соответствуют два измеренных значения выходного сигнала калибруемой аппаратуры $X_1 \pm \Delta_{ор1}$ и $X_2 \pm \Delta_{ор2}$.

На основании таких исходных данных может быть составлена система двух уравнений с двумя неизвестными a и b в следующем виде:

$$Y_{1э} = a + b \cdot \ln(X_1);$$
$$Y_{2э} = a + b \cdot \ln(X_2). \qquad (64)$$

Найдем решение этой системы, исходя из предположения, что $a=Y_{1э}$. Это возможно только в том случае, когда второе слагаемое в первом уравнении равно 0 при $ln(1)=0$ после замены переменной X на X/X_1. Тогда b найдем из второго уравнения:

$$b = \frac{Y_{2э} - Y_{1э}}{\ln(X_2/X_1)}. \qquad (65)$$

В итоге КФ имеет вид

$$Y = Y_{1э} + \frac{Y_{2э} - Y_{1э}}{ln(X_2/X_1)} \cdot ln(\frac{X}{X_1}). \qquad (66)$$

За оценку погрешности аппаратуры с вновь построенной логарифмической КФ принимается максимальная из погрешностей эталонов (либо, $\pm\Delta_{ор1э}$ либо $\pm\Delta_{ор2э}$), когда погрешностью измерений параметров выходного сигнала можно пренебречь.

Если погрешностью измерений параметров выходного сигнала пренебречь нельзя, то за оценку абсолютной погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимается максимальное из значений, вычисленных по формулам (57) и (58).

Статистический способ

Исходные данные: эталон воспроизводит более двух значений измеряемого параметра, например, для n значений $Y_{1э} \pm \Delta_{ор1э}$,

$Y_{2э} \pm \Delta_{ор2э}$, … и $Y_{nэ} \pm \Delta_{орnэ}$; им соответствуют n измеренных значений выходного сигнала градуируемой аппаратуры $X_1 \pm \Delta_{ор1}$, $X_2 \pm \Delta_{ор2}$, … и $X_n \pm \Delta_{орn}$.

На основании таких исходных данных может быть составлена система n линейных уравнений с двумя неизвестными a и b в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y_{1э} &= a + b \cdot \ln(X_1) \\ Y_{2э} &= a + b \cdot \ln(X_2) \\ &\dots \\ Y_{nэ} &= a + b \cdot \ln(X_n). \end{aligned} \tag{67}$$

Найдем решение этой системы, исходя из предположения, что $a=Y_{1э}$. Заменим переменную X на X/X_1 и приравняем суммы левой и правой частей системы. Из полученного уравнения найдем b как:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_{iэ} - n \cdot Y_{1э}}{\sum_{i=1}^{n} \ln\left(\frac{X_i}{X_1}\right)}. \tag{68}$$

Для оценки погрешности калибровки СИ необходимо найти отклонения экспериментальных точек от построенной КФ с коэффициентами a и b. Для этого в каждой i-й точке контроля необходимо по построенной КФ определить измеренное значение $Y_{изм,i}$ при выходном сигнале X_i. Затем в каждой i-й точке контроля вычислить поправку по формуле

$$\theta_i = Y_{iэ} - Y_{изм,i}. \tag{69}$$

Для каждой точки контроля абсолютную погрешность Δ_i найдем как алгебраическую сумму модуля поправки и модуля погрешности i-го эталона $\left|\Delta_{ориэ}\right|$:

$$\Delta_i = \pm\left(\left|\tilde{\theta}_i\right| + \left|\Delta_{ориэ}\right|\right) \tag{70}$$

и либо выберем максимальную из них, либо построим зависимость оценки погрешности от измеряемого параметра.

Если погрешностью измерений параметров выходного сигнала пренебречь нельзя, то за оценку погрешности аппаратуры принимает-

ся максимальное значение, вычисленное во всех точках контроля с использованием вновь построенной КФ, по формуле

$$\Delta = \pm(|\theta_i| + Y_{эi} \cdot \sqrt{\frac{\Delta^2_{орэi}}{Y^2_{эi}} + \frac{\Delta^2_{op}}{X_i^2}})_{\max} . \qquad (71)$$

9.5 Способ построения линейной КФ в виде функции двух переменных $Y = a + b \cdot T + (c + d \cdot T) \cdot X$

Предполагается, что зависимость изменения показаний X от влияющей величины T линейна на основании априорных данных.Тогда калибровочную функцию можно представить в виде плоской поверхности $Y = a + b \cdot T + (c + d \cdot T) \cdot X$.

В общем случае исходные данные следующие: эталон воспроизводит 4 значения измеряемого параметра $Y_{1э}\pm\Delta_{1э}$, $Y_{2э}\pm\Delta_{2э}$, $Y_{3э}\pm\Delta_{3э}$, $Y_{4э}\pm\Delta_{4э}$; для каждого эталона соответственно воспроизводятся 4 разных значения влияющей величины $T_1\pm\Delta_1$, $T_2\pm\Delta_2$, $T_3\pm\Delta_3$, $T_4\pm\Delta_4$. Им соответствуют четыре измеренных значения выходного сигнала калибруемой аппаратуры $X_1\pm\Delta_{x1}$, $X_2\pm\Delta_{x2}$, $X_3\pm\Delta_{x3}$, $X_4\pm\Delta_{x4}$.

На основании таких исходных данных может быть составлена система четырех линейных уравнений с четырьмя неизвестными *a, b, c* и *d* в следующем виде:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a + b \cdot T_1 + (c + d \cdot T_1) \cdot X_1 \\ Y_2 &= a + b \cdot T_2 + (c + d \cdot T_2) \cdot X_2 \\ Y_3 &= a + b \cdot T_3 + (c + d \cdot T_3) \cdot X_3 \\ Y_4 &= a + b \cdot T_4 + (c + d \cdot T_4) \cdot X_4. \end{aligned} \qquad (72)$$

Составим и вычислим основной определитель этой системы

$$\begin{vmatrix} 1 & T_1 & X_1 & T_1 \cdot X_1 \\ 1 & T_2 & X_2 & T_2 \cdot X_2 \\ 1 & T_3 & X_3 & T_3 \cdot X_3 \\ 1 & T_4 & X_4 & T_4 \cdot X_4 \end{vmatrix} \qquad (73)$$

$$\Delta = (T_2-T_1)(T_4-T_3)(X_1X_2+X_3X_4)+(T_3-T_1)(T_4-T_2)(X_1X_3+X_2X_4)+(T_4-T_1)(T_3-T_2)(X_4X_1+X_2X_3).$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов *a, b, c* и *d* алгебраическим методом Крамера составим и вычислим соответствующие дополнительные определители, поменяв столбцы в основном определителе на соответствующие эталонные значения.

$$\begin{vmatrix} Y_1 & T_1 & X_1 & T_1 \cdot X_1 \\ Y_2 & T_2 & X_2 & T_2 \cdot X_2 \\ Y_3 & T_3 & X_3 & T_3 \cdot X_3 \\ Y_4 & T_4 & X_4 & T_4 \cdot X_4 \end{vmatrix} \quad \text{для } a, \qquad (74)$$

$$\begin{vmatrix} 1 & Y_1 & X_1 & T_1 \cdot X_1 \\ 1 & Y_2 & X_2 & T_2 \cdot X_2 \\ 1 & Y_3 & X_3 & T_3 \cdot X_3 \\ 1 & Y_4 & X_4 & T_4 \cdot X_4 \end{vmatrix} \quad \text{для } b, \qquad (75)$$

$$\begin{vmatrix} 1 & T_1 & Y_1 & T_1 \cdot X_1 \\ 1 & T_2 & Y_2 & T_2 \cdot X_2 \\ 1 & T_3 & Y_3 & T_3 \cdot X_3 \\ 1 & T_4 & Y_4 & T_4 \cdot X_4 \end{vmatrix} \quad \text{для } c, \qquad (76)$$

$$\begin{vmatrix} 1 & T_1 & X_1 & Y_1 \\ 1 & T_2 & X_2 & Y_2 \\ 1 & T_3 & X_3 & Y_3 \\ 1 & T_4 & X_4 & Y_4 \end{vmatrix} \quad \text{для } d. \qquad (77)$$

Разделим каждый из дополнительных определителей на основной определитель матрицы и найдем коэффициенты *a, b, c* и *d*.

Если в КПФ переменную T заменить переменой $T\text{-}T_0$, где T_0 – нормальное значение влияющей величины, то коэффициенты *a, b, c* и *d* можно найти описанным выше способом.

Обычно погрешностью измерений влияющей величины и выходного сигнала можно пренебречь. Тогда за оценку погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимается максимальная из погрешностей эталонов (либо $\pm\Delta_{op1э}$, либо $\pm\Delta_{op2э}$).

9.6 *Статистический способ построения линейной КФ в виде функции трех переменных* Y=a+bX+cU+dZ+fXU+pXZ+qUZ+sXUZ

Рассмотрим случай трех выходных сигналов X, U, Z от одной измеряемой величины Y и от двух каких-либо взаимозависимых влияющих величин. Вместо выходных сигналов U и Z могут быть использованы сами влияющие величины.

Составам систему из 9-ти уравнений с 8-ю неизвестными:

$$
\begin{aligned}
&Y_{11}=a+bX_{111}+cU_{111}+dZ_{111}+fX_{111}U_{111}+pX_{111}Z_{111}+qU_{111}\,Z_{111}+sX_{111}U_{111}Z_{111}\\
&Y_{12}=a+bX_{112}+cU_{112}+dZ_{112}+fX_{112}U_{112}+pX_{112}Z_{112}+qU_{112}\,Z_{112}+sX_{112}U_{112}Z_{112}\\
&Y_{13}=a+bX_{113}+cU_{113}+dZ_{113}+fX_{113}U_{113}+pX_{113}Z_{113}+qU_{113}\,Z_{113}+sX_{113}U_{113}Z_{113}\\
&Y_{21}=a+bX_{121}+cU_{121}+dZ_{121}+fX_{121}U_{121}+pX_{121}Z_{121}+qU_{121}\,Z_{121}+sX_{121}U_{121}Z_{121}\\
&Y_{22}=a+bX_{122}+cU_{122}+dZ_{122}+fX_{122}U_{122}+pX_{122}Z_{122}+qU_{122}\,Z_{122}+sX_{122}U_{122}Z_{122}\\
&Y_{23}=a+bX_{123}+cU_{133}+dZ_{123}+fX_{133}U_{123}+pX_{123}Z_{123}+qU_{123}\,Z_{123}+sX_{123}U_{123}Z_{123}\\
&Y_{31}=a+bX_{131}+cU_{131}+dZ_{131}+fX_{131}U_{131}+pX_{131}Z_{121}+qU_{131}\,Z_{121}+sX_{131}U_{131}Z_{131}\\
&Y_{32}=a+bX_{132}+cU_{132}+dZ_{132}+fX_{132}U_{132}+pX_{132}Z_{122}+qU_{132}\,Z_{122}+sX_{132}U_{132}Z_{132}\\
&Y_{33}=a+bX_{133}+cU_{133}+dZ_{133}+fX_{133}U_{133}+pX_{133}Z_{123}+qU_{133}\,Z_{123}+sX_{133}U_{133}Z_{133}
\end{aligned}
\qquad (78)
$$

Система не имеет точного решения, поэтому решается статистическим способом. Преобразуем эту систему в другую систему из 8 нормальных уравнений с 8-ю неизвестными. Для этого необходимо обе части каждого уравнения умножить сначала на числовой коэффициент перед неизвестной **a** (он равен 1), а затем найти суммы левой и правой частей. Получим первое нормальное уравнение:

$$\sum Y=a+b\cdot\sum X+c\cdot\sum U+d\cdot\sum Z+f\cdot\sum(X\cdot U)+p\cdot\sum(X\cdot Z)+q\cdot\sum(U\cdot Z)+s\cdot\sum(X\cdot U\cdot Z) \qquad (79)$$

Затем обе части каждого уравнения умножим на числовой коэффициент перед неизвестной **b** (он равен X), а затем найдем суммы левой и правой частей. Получим второе уравнение.

$$\sum YX=a\cdot\sum X+b\cdot\sum X^2+c\cdot\sum U\cdot X+d\cdot\sum Z\cdot X+f\cdot\sum(X^2\cdot U)+p\cdot\sum(X^2\cdot Z)+q\cdot\sum(X\cdot U\cdot Z)+s\cdot\sum(X^2\cdot U\cdot Z) \qquad (80)$$

Умножим обе части каждого уравнения на числовой коэффициент перед неизвестной **c** (он равен U), а затем найдем суммы левой и правой частей. Получим третье уравнение.

$$\sum Y\,U=a\cdot\sum U+b\cdot\sum X\,U+c\cdot\sum U^2+d\cdot\sum Z\cdot U+f\cdot\sum(X\cdot U^2)+p\cdot\sum(X\cdot\,U\,Z)+q\cdot\sum(U^2\cdot Z)+s\cdot\sum(X\cdot U^2\cdot Z)$$

В итоге, после аналогичных преобразований, получим следующую систему нормальных уравнений:

$$\sum Y=a+b\cdot\sum X+c\cdot\sum U+d\cdot\sum Z+f\cdot\sum(X\cdot U)+p\cdot\sum(X\cdot Z)+q\cdot\sum(U\cdot Z)+s\cdot\sum(X\cdot U\cdot Z); \qquad (81)$$

$$\sum Y\cdot X=a\cdot\sum X+b\cdot\sum X^2+c\cdot\sum U\cdot X+d\cdot\sum Z\cdot X+f\cdot\sum(X^2\cdot U)+p\cdot\sum(X^2\cdot Z)+q\cdot\sum(X\cdot U\cdot Z)+s\cdot\sum(X^2\cdot U\cdot Z);$$

$$\sum Y\,U=a\cdot\sum U+b\cdot\sum X\,U+c\cdot\sum U^2+d\cdot\sum Z\cdot U+f\cdot\sum(X\cdot U^2)+p\cdot\sum(X\cdot\,U\,Z)+q\cdot\sum(U^2\cdot Z)+s\cdot\sum(X\cdot U^2\cdot Z);$$

$$\sum YZ = a\cdot\sum Z + b\cdot\sum XZ + c\cdot\sum UZ + d\cdot\sum Z^2 + f\cdot\sum(X\cdot UZ) + p\cdot\sum(X\cdot Z^2) + q\cdot\sum(U\cdot Z^2) + s\cdot\sum(X\cdot U\cdot Z^2);$$

$$\sum Y\cdot XU = a\cdot\sum XU + b\cdot\sum X^2U + c\cdot\sum U^2\cdot X + d\cdot\sum Z\cdot XU + f\cdot\sum(X^2\cdot U^2) + p\cdot\sum(X^2U\cdot Z) + q\cdot\sum(X\cdot U^2\cdot Z) + s\cdot\sum(X^2\cdot U^2\cdot Z);$$

$$\sum Y\cdot XZ = a\cdot\sum XZ + b\cdot\sum X^2Z + c\cdot\sum U\cdot XZ + d\cdot\sum Z^2\cdot X + f\cdot\sum(X^2\cdot UZ) + p\cdot\sum(X^2\cdot Z^2) + q\cdot\sum(X\cdot U\cdot Z^2) + s\cdot\sum(X^2\cdot U\cdot Z^2);$$

$$\sum YUZ = a\cdot\sum UZ + b\cdot\sum XUZ + c\cdot\sum U^2Z + d\cdot\sum Z^2\cdot U + f\cdot\sum(X\cdot U^2Z) + p\cdot\sum(X\cdot UZ^2) + q\cdot\sum(U^2\cdot Z^2) + s\cdot\sum(X\cdot U^2\cdot Z^2);$$

$$\sum YXUZ = a\cdot\sum XUZ + b\cdot\sum X^2UZ + c\cdot\sum XU^2Z + d\cdot\sum X\cdot UZ^2 + f\cdot\sum(X^2\cdot U^2Z) + p\cdot\sum(X^2\cdot UZ^2) + q\cdot\sum(XU^2\cdot Z^2) + s\cdot\sum(X^2\cdot U^2\cdot Z^2).$$

Составим определитель матрицы коэффициентов.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & \sum X & \sum U & \sum Z & \sum(XU) & \sum(XZ) & \sum(UZ) & \sum(XUZ) \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XU & \sum XZ & \sum(X^2U) & \sum(X^2Z) & \sum(XUZ) & \sum(X^2UZ) \\ \sum U & \sum XU & \sum U^2 & \sum ZU & \sum(XU^2) & \sum(XUZ) & \sum(U^2Z) & \sum(XU^2Z) \\ \sum Z & \sum XZ & \sum UZ & \sum Z^2 & \sum(X\cdot UZ) & \sum(XZ^2) & \sum(UZ^2) & \sum(XUZ^2) \\ \sum XU & \sum X^2U & \sum XU^2 & \sum ZXU & \sum(X^2U^2) & \sum(X^2UZ) & \sum(XU^2Z) & \sum(X^2U^2Z) \\ \sum XZ & \sum X^2Z & \sum XUZ & \sum Z^2X & \sum(X^2UZ) & \sum(X^2Z^2) & \sum(XUZ^2) & \sum(X^2UZ^2) \\ \sum UZ & \sum XUZ & \sum U^2Z & \sum Z^2U & \sum(XU^2Z) & \sum(XUZ^2) & \sum(U^2Z^2) & \sum(XU^2Z^2) \\ \sum XUZ & \sum X^2UZ & \sum XU^2Z & \sum XUZ^2 & \sum(X^2U^2Z) & \sum(X^2UZ^2) & \sum(XU^2Z^2) & \sum(X^2U^2Z^2) \end{vmatrix} \quad (82)$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов *a, b, c, d, f, p, q, s* алгебраическим методом Крамера составим и вычислим соответствующие дополнительные определители, поменяв столбцы в основном определителе на соответствующие эталонные значения.

Для определения коэффициента **a** находим определитель в виде:

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} \sum Y & \sum X & \sum U & \sum Z & \sum(XU) & \sum(XZ) & \sum(UZ) & \sum(XUZ) \\ \sum YX & \sum X^2 & \sum XU & \sum XZ & \sum(X^2U) & \sum(X^2Z) & \sum(XUZ) & \sum(X^2UZ) \\ \sum YU & \sum XU & \sum U^2 & \sum ZU & \sum(XU^2) & \sum(XUZ) & \sum(U^2Z) & \sum(XU^2Z) \\ \sum YZ & \sum XZ & \sum UZ & \sum Z^2 & \sum(X\cdot UZ) & \sum(XZ^2) & \sum(UZ^2) & \sum(XUZ^2) \\ \sum YXU & \sum X^2U & \sum XU^2 & \sum ZXU & \sum(X^2U^2) & \sum(X^2UZ) & \sum(XU^2Z) & \sum(X^2U^2Z) \\ \sum YXZ & \sum X^2Z & \sum XUZ & \sum Z^2X & \sum(X^2UZ) & \sum(X^2Z^2) & \sum(XUZ^2) & \sum(X^2UZ^2) \\ \sum YUZ & \sum XUZ & \sum U^2Z & \sum Z^2U & \sum(XU^2Z) & \sum(XUZ^2) & \sum(U^2Z^2) & \sum(XU^2Z^2) \\ \sum YXUZ & \sum X^2UZ & \sum XU^2Z & \sum XUZ^2 & \sum(X^2U^2Z) & \sum(X^2UZ^2) & \sum(XU^2Z^2) & \sum(X^2U^2Z^2) \end{vmatrix} \quad (83)$$

Для определения коэффициента **b** находим определитель в виде

$$\Delta_b=\begin{vmatrix} 1 & \sum Y & \sum U & \sum Z & \sum(XU) & \sum(XZ) & \sum(UZ) & \sum(XUZ) \\ \sum X & \sum YX & \sum XU & \sum XZ & \sum(X^2U) & \sum(X^2Z) & \sum(XUZ) & \sum(X^2UZ) \\ \sum U & \sum YU & \sum U^2 & \sum ZU & \sum(XU^2) & \sum(XUZ) & \sum(U^2Z) & \sum(XU^2Z) \\ \sum Z & \sum YZ & \sum UZ & \sum Z^2 & \sum(X\cdot U\,Z) & \sum(XZ^2) & \sum(UZ^2) & \sum(XUZ^2) \\ \sum XU & \sum YXU & \sum XU^2 & \sum ZXU & \sum(X^2U^2) & \sum(X^2UZ) & \sum(XU^2Z) & \sum(X^2U^2Z) \\ \sum XZ & \sum YXZ & \sum XUZ & \sum Z^2X & \sum(X^2UZ) & \sum(X^2Z^2) & \sum(XUZ^2) & \sum(X^2UZ^2) \\ \sum UZ & \sum YUZ & \sum U^2Z & \sum Z^2U & \sum(XU^2Z) & \sum(XUZ^2) & \sum(U^2Z^2) & \sum(XU^2Z^2) \\ \sum XUZ & \sum YXUZ & \sum XU^2Z & \sum X\,U\,Z^2 & \sum(X^2U^2Z) & \sum(X^2UZ^2) & \sum(XU^2Z^2) & \sum(X^2U^2Z^2) \end{vmatrix} \quad (84)$$

Для определения коэффициента **c** находим определитель в виде

$$\Delta_c=\begin{vmatrix} 1 & \sum X & \sum Y & \sum Z & \sum(XU) & \sum(XZ) & \sum(UZ) & \sum(XUZ) \\ \sum X & \sum X^2 & \sum YX & \sum XZ & \sum(X^2U) & \sum(X^2Z) & \sum(XUZ) & \sum(X^2UZ) \\ \sum U & \sum XU & \sum YU & \sum ZU & \sum(XU^2) & \sum(XUZ) & \sum(U^2Z) & \sum(XU^2Z) \\ \sum Z & \sum XZ & \sum YZ & \sum Z^2 & \sum(X\cdot U\,Z) & \sum(XZ^2) & \sum(UZ^2) & \sum(XUZ^2) \\ \sum XU & \sum X^2U & \sum YXU & \sum ZXU & \sum(X^2U^2) & \sum(X^2UZ) & \sum(XU^2Z) & \sum(X^2U^2Z) \\ \sum XZ & \sum X^2Z & \sum YXZ & \sum Z^2X & \sum(X^2UZ) & \sum(X^2Z^2) & \sum(XUZ^2) & \sum(X^2UZ^2) \\ \sum UZ & \sum XUZ & \sum YUZ & \sum Z^2U & \sum(XU^2Z) & \sum(XUZ^2) & \sum(U^2Z^2) & \sum(XU^2Z^2) \\ \sum XUZ & \sum X^2UZ & \sum YXUZ & \sum X\,U\,Z^2 & \sum(X^2U^2Z) & \sum(X^2UZ^2) & \sum(XU^2Z^2) & \sum(X^2U^2Z^2) \end{vmatrix} \quad (85)$$

Для определения остальных коэффициентов находим определители аналогично, заменив соответствующие столбцы основного определителя на столбец с эталонными значениями.

В итоге коэффициенты КФ найдем коэффициенты *a, b, c, d, f, p, q, s*, разделив каждый из дополнительных определителей на основной определитель матрицы, по следующим формулам:

$$a=\frac{\Delta a}{\Delta};\qquad b=\frac{\Delta b}{\Delta};\qquad c=\frac{\Delta c}{\Delta};\qquad d=\frac{\Delta d}{\Delta};$$

$$f=\frac{\Delta f}{\Delta};\qquad p=\frac{\Delta p}{\Delta};\qquad q=\frac{\Delta q}{\Delta};\qquad s=\frac{\Delta s}{\Delta}. \quad (86)$$

Рассмотренный статистический способ является универсальным. Если есть предпосылки нелинейности влияния каких либо переменных на показания аппаратуры, то можно использовать любые нелинейные функции таких переменных, например, Ln(*X*), Ln(*U*), Ln(*Z*).

10 Экспериментальная оценка метрологических характеристик геофизических средств измерений

Калибровка СИ основана на измерительном эксперименте с использованием эталонов и эталонных установок.

Целью калибровки является только определение числовых значений тех характеристик, которые отражают его реальные метрологические свойства. Обычно это поправки и характеристики погрешности. Для индивидуально градуируемых средств измерений это ещё и параметры (коэффициенты) КФ. Калибровка по смыслу близка к метрологическим исследованиям средств измерений.

В разделе 9 была рассмотрена часть калибровки СИ, связанная с построением КФ, то есть с первичной передачей единицы величины. Однако остаются другие МХ, которые необходимо определять в процессе применения СИ, хранящего переданную единицу.

В Законе 102-ФЗ дана следующая формулировка: "***Калибровка*** *СИ – это* ***совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик***".

Из данного определения видно, что при калибровке не требуется подтверждение соответствия калибруемых средств измерений метрологическим требованиям, то есть нет необходимости проверять выполнимость неравенства, в котором оцененные действительные значения метрологических характеристик должны быть меньше их нормированных значений. Иными словами, в процедуре калибровки отсутствует правовой ("юридический") аспект, направленный на отбраковку ("осуждение") СИ.

Рассмотрим типовые методики определения некоторых метрологических характеристик СИ, используемых в реальных методиках калибровки или поверки геофизической аппаратуры.

10.1 Аддитивная и мультипликативная поправки

На рисунке 28 показано графическое отображение на числовой оси реального измерительного процесса с большим числом измеренных значений (случайная погрешность, обусловленная разбросом измеренных значений, пренебрежимо мала).

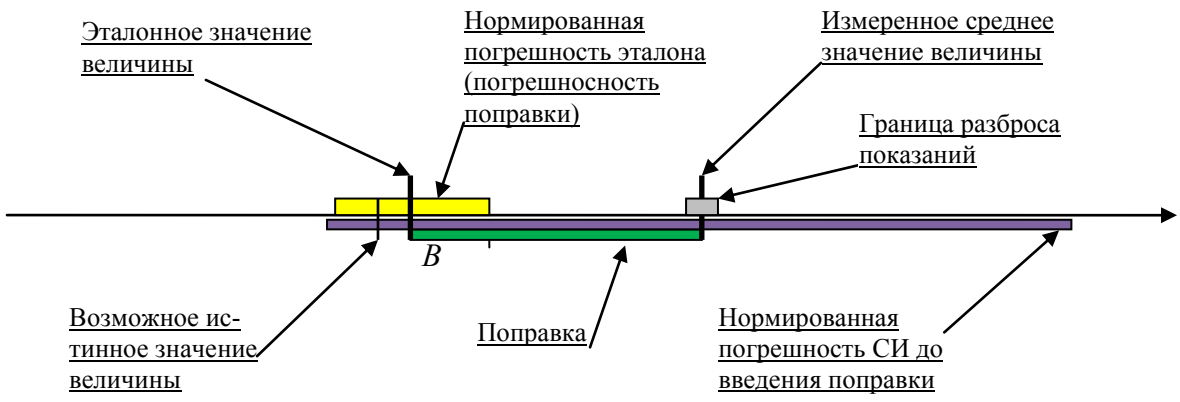


Рисунок 28 – Графическое отображение на числовой оси элементов реального измерительного процесса калибровки

Если выполнить коррекцию измеренного значения величины путем введения поправки, то измеренное среднее значение совпадёт с эталонным значением измеряемой величины, а погрешность станет равной погрешности эталона (на момент определения поправки). Поскольку за измеренное значение принято среднее значение показаний, то случайная погрешность от этого разброса на рисунке 20 не отображена из-за её малости по сравнению с погрешностью эталона.

Аддитивную $\theta_{нi}$ и мультипликативную $k_{\theta нi}$ поправки в i-й точке контроля СИ в нормальных условиях измерений определяют по формулам:

$$\theta_{нi}=B_{эi}-B_{измi}, \qquad k_{\theta нi}= B_{эi}/B_{измi}, \tag{87}$$

если выполнено однократное измерение параметра в каждой точке контроля, или по формулам:

$$\theta_{нi} = B_{iэ} - \overline{B}_{измi}, \quad k_{\theta нi} = B_{эi} / \overline{B}_{измi}, \tag{88}$$

если выполнены многократные измерения параметра B,
где $B_{iэ}$ – эталонное значение параметра B в i-й точке контроля; $\overline{B}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} B_{ij}$ – среднее арифметическое измеренных значений; B_{ij} – j-е измеренное значение параметра B в i-й точке контроля; n – число выполненных измерений в контрольной точке(j = от 1 до n).

Если выполнить новую серию измерений, то получим другую оценку поправки. Обычно погрешностью оценки среднего пренебрегают ввиду ее малости и за погрешность поправки принимают нормированную или оцененную погрешность использованного эталона.

10.2 Среднее квадратическое отклонение

Случайные составляющие погрешности измерений, оцениваемые при калибровке СИ, обычно распределены по закону, близкому к усеченному нормальному.

Оценку СКО случайной составляющей основной абсолютной погрешности СИ определяют по формуле

$$\tilde{\sigma}\left[\dot{\Delta}_o\right] = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(B_{ij} - \overline{B}_i)^2}\ , \qquad (89)$$

где B_{ij} – j-е измеренное значение в i-й контрольной точке;

$\overline{B}_i$ – среднее значение параметра из n измеренных значений параметра B в i-й контрольной точке.

Если выполнить новую серию измерений, то получим другую оценку СКО погрешности СИ.

10.3 Вариация (гистерезис) показаний

Вариация (гистерезис) показаний СИ - разность между показаниями при изменении измеряемой величины со стороны больших и меньших значений в одной и той же точке контроля в нормальных условиях измерений.

Вариация ($в_i$) в i-й точке контроля равна разности между показаниями каверномера при изменении диаметра кольца со стороны больших ($B_{изм\text{-}бi}$) и меньших ($B_{изм\text{-}мi}$) значений:

$$в_i = B_{изм-бi} - B_{изм-мi}\ . \qquad (90)$$

Под воздействием влияющей величины вариация показаний СИ может изменяться.

Аддитивную поправку θ_i к показаниям СИ с учетом вариации в i-й точке контроля определяют по формуле

$$\theta_i = B_{эi} - \frac{B_{изм-мi} + B_{изм-бi}}{2} \quad , \tag{91}$$

где $B_{эi}$ - эталонное значение величины, воспроизводимое в i-й точке контроля.

За погрешность поправки к показаниям СИ $\Delta[\theta_i]$ в i-й точке контроля принимается погрешность, равная абсолютной величине нормированной погрешности эталона $\pm\Delta_{орэi}$, плюс половина вариации показаний $в_i$:

$$\Delta[\theta_i] = \pm(\Delta_{орэi} + \frac{в_{di}}{2}) \, . \tag{92}$$

Если введение поправки не предполагается, то за погрешность СИ Δ_i в i-й точке контроля принимается сумма поправки (по абсолютной величине), нормированной погрешности эталона $\Delta_{орэi}$ и половины вариации показаний $в_i$:

$$\Delta_i = \pm(|\theta_i| + \Delta_{орэi} + \frac{в_i}{2}) \, . \tag{93}$$

10.4 Изменение показаний СИ за нормированное время его непрерывной работы

Максимальные изменения показаний СИ за время τ, регламентированное в его документации, определяют по формуле

$$\theta_\tau = |B_\tau - B_o|_{\max} \, , \tag{94}$$

если случайная составляющая основной погрешности несущественна, где B_τ – измеренное значение параметра B (показания аппаратуры) в течение времени τ непрерывной работы; B_o – измеренное значение параметра B в начальный момент времени $\tau = 0$ при контроле стабильности аппаратуры.

Если случайная составляющая погрешности нормирована, то такие изменения во времени определяют по формуле

$$\theta_\tau = \left|\overline{B}_\tau - \overline{B}_o\right|_{\max}, \qquad (95)$$

где $\overline{B}_\tau$ – среднее значение показаний аппаратуры в течение времени непрерывной работы τ ; $\overline{B}_o$ – среднее значение показаний аппаратуры в начальный момент времени ($\tau = 0$) контроля ее стабильности.

10.5 Поправочная функция влияния изменения температуры на показания скважинной аппаратуры

ПФ влияния изменения температуры T относительно нормального значения T_0 на показания СИ (температурная поправка) оценивается и строится в следующей последовательности:

1) в камеру термостата помещают скважинную часть аппаратуры и убеждаются в том, что начальная температура в камере установилась в пределах $T_0 = (20\pm5)^{\circ}$C;

2) фиксируют значение начальной температуры T_0 и значение измеряемого параметра X (показания аппаратуры) при температуре T и заносят их в протокол калибровки;

3) включают термостат и обеспечивают скорость изменения температуры не более 2°C в минуту;

4) по мере изменения температуры в термостате следят за изменениями показаний калибруемой аппаратуры, фиксируя и занося в протокол эти показания не менее, чем при пяти значениях температуры T, равномерно распределенных в нормированном диапазоне, включая нижнее и верхнее значения;

5) следят, чтобы изменение температуры в камере термостата за время считывания показаний (в том числе и при многократных измерениях) не превышало, например, 2°C;

6) строят по точкам функцию влияния температуры на показания аппаратуры в виде графика функции, представляющей собой зависимость изменения показаний от текущего значения температуры в камере термостата.

Если характеристика случайной погрешности нормирована или случайная погрешность признана существенной, то при каждом значении температуры выполняют многократные измерения воспроизводимой величины.

11 Поверка геофизических средств измерений

11.1 Подтверждение соответствия

В процессе эксплуатации средства измерений могут изменять свои метрологические характеристики во времени в результате воздействия окружающей среды и старения веществ, материалов, электронных компонентов. Требуется периодический контроль (проверка, поверка) стабильности (неизменности) этих характеристик для получения подтверждения готовности средства измерений к выполнению измерительной функции.

Поверка СИ – установление официально уполномоченным органом пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям [19].

Поверка СИ – это *совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения его соответствия метрологическим требованиям* (формулировка из Закона 102-ФЗ).

Из этих определений следует, что процедура поверки СИ содержит правовой (юридический) аспект, направленный на подтверждение годности конкретного экземпляра СИ к применению по назначению – измерять конкретную величину в нормированном диапазоне измерений в пределах нормированной погрешности. Таким образом, понятие "поверка" процедурно шире понятия "калибровка". Как упоминалось, калибровку можно условно считать составной частью поверки, если при этом используются результаты калибровки.

Главной процедурой при поверке, как и при калибровке, является измерительный эксперимент с использованием эталонов.

Метрологические требования обычно изложены в стандартах и в паспорте на СИ и включают нормированные значения метрологических характеристик. Однако при поверке чаще всего подтверждается соответствие только характеристик их погрешности.

Поверка средств измерений по характеристикам погрешности может быть выполнена двумя способами:

1) *с использованием результатов калибровки* (с определением поправки, оценки среднего квадратического отклонения, вариации,

максимального изменения показаний во времени и характеристик влияния в зависимости от номенклатуры нормированных характеристик основной и дополнительной погрешности);

2) *без использования результатов калибровки* (по нахождениям показаний или выходного сигнала в пределах допускаемых значений), то есть формально "по допуску" (этот способ в геофизике не используется).

Поверка может быть **обязательной**, если поверяемое СИ находится в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (статья 1 Закона № 102), или **добровольной** (статья 13). Обязательная поверка ранее называлась "государственной поверкой" средств измерений. Обязательная или добровольная поверка средств измерений выполняется поверителем ("юристом"), аккредитованным на техническую компетентность уполномоченным компетентным органом.

На *геофизические* СИ сфера действия государственного регулирования обеспечения единства измерений не распространяется, поэтому они могут подвергаться поверке метрологической службой геофизического предприятия с использованием результатов калибровки *в добровольном порядке*. Причем на большинстве предприятий поддерживаются жесткие требования по подтверждению соответствия геофизической аппаратуры установленным метрологическим требованиям. Перечень геофизических СИ, подвергаемых периодической поверке, составляется и утверждается руководителем геофизического предприятия.

Если метрологическая служба предприятия оказывает услуги по калибровке геофизической аппаратуры другим предприятиям, то она должна периодически подтверждать свою техническую компетентность на соответствие требования стандарта ИСО/МЭК 17025 путем регистрации в Реестре Российской системы калибровки.

В эксплуатационной документации (например, в "Техническом описании и руководстве по эксплуатации") на геофизические СИ конкретного типа в разделе "Поверка" должны быть указаны:

1) типы и основные характеристики используемых эталонов;

2) перечень МХ, подлежащих определению или контролю;

3) диапазон значений измеряемого параметра и число точек контроля, воспроизводимых при поверке;

4) число измерений в каждой точке контроля;

5) методика определения МХ.

Поверка геофизической аппаратуры по основной погрешности выполняется на основании измерений параметра, воспроизводимого эталоном. Если нормированы систематическая и случайная погрешности, то всегда выполняются многократные измерения.

При проведении поверки должны быть применены эталоны, имеющие свидетельство о поверке или сертификат калибровки.

Поверка эталонов после первичной калибровки

Если осталось **прежнее** воспроизводимое значение величины Или прежние коэффициенты КФ или КПФ, то поверка.

Если принято **новое** воспроизводимое значение величины или новые коэффициенты КФ или КПФ, то калибровка.

11.2 Основные операции поверки

В общем случае поверка геофизической аппаратуры по основной погрешности включает следующие **основные операции**:

1) внешний осмотр и опробование;

2) выполнение измерений;

3) обработку измеренных значений и нахождение оценок поправок в точках контроля;

4) определение годности (негодности) аппаратуры к применению путем сравнения полученной оценки поправки с нормированным пределом основной абсолютной погрешности (или с контрольным допуском);

5) оформление результатов поверки (протокола и свидетельства о поверке или извещения о непригодности).

При проведении поверки не должно быть вибраций, тряски, ударов, электрических и магнитных полей, являющихся источниками погрешности, а также должны быть соблюдены нормальные условия измерений: температура окружающей среды (20 ± 5)^{o}С; относительная влажность (65 ± 15) %; атмосферное давление (100 ± 6) кПа; напряжение и частота тока питания (220 ± 5) В, (50,0 ± 0,5) Гц.

Индивидуально-градуируемая аппаратура поступает на поверку вместе с действующей КФ. При проведении внешнего осмотра должно быть установлено соответствие ее комплектности требованиям руководства по эксплуатации, отсутствие механических повреждений

аппаратуры, влияющих на ее работоспособность и МХ. Аппаратура, забракованная при внешнем осмотре, дальнейшей поверке не подлежит.

При опробовании аппаратуры следует проверить ее работоспособность.

В зависимости от комплекса НМХ СИ применяют различные методики измерений параметров, воспроизводимых при его поверке.

Если в комплексе НМХ отсутствуют характеристики случайной составляющей погрешности и вариации, а в эксплуатационной документации не указано число измерений в контрольных точках, то метролог убеждается в отсутствии необходимости строить отдельную МИ на основе многократных измерений. В этом случае выполняют трехкратные измерения параметра вблизи середины диапазона (или вблизи другого значения, где возможно появление наибольших значений случайной составляющей погрешности).

Если размах показаний при этом не превышает 20 % от допускаемой основной погрешности, то в дальнейшем МИ строят на основе однократных измерений, в противном случае измерения в каждой контрольной точке выполняют не менее пяти раз.

Если в комплексе НМХ каверномера-профилемера отсутствуют сведения о допускаемой вариации, то в ее несущественности убеждаются с помощью калибровочного устройства, позволяющего воспроизведение диаметра (радиуса) плавно как со стороны меньших, так и со стороны больших значений. Если оценка вариации не превышает 20 % от допускаемой основной погрешности каверномера-профилемера, то МИ строят без оценки вариации.

Если в комплексе НМХ имеются характеристики случайной составляющей погрешности, то рекомендуется проводить не менее 10 измерений в каждой контрольной точке. Если нормирована еще и вариация, то многократные измерения выполняют поочередно сначала со стороны меньших, а затем со стороны больших значений.

При контроле характеристик изменения показаний СИ за установленный интервал времени выполняют измерения параметра, воспроизводимого в диапазоне (0,5 – 0,9) от верхнего значения диапазона измерений в начальный момент времени и через каждые 20 % от времени, указанного в документации для этой характеристики.

11.3 Документирование соответствия

Установление годности аппаратуры к применению по результатам поверки осуществляется на основании сравнения вычисленных оценок МХ с нормированными значениями этих характеристик и погрешности эталонов.

Например, геофизическую аппаратуру можно считать годной к эксплуатации с вероятностью 1, если в каждой точке контроля оценка ее абсолютной погрешности, за которую принимается оценка поправки по модулю плюс допускаемая погрешность эталона, меньше допускаемой погрешности СИ

$$| \theta_н | + \Delta_э < \Delta_{од}. \qquad (96)$$

Геофизическая аппаратура считается пригодной к эксплуатации, если реальная ПФ влияния температуры не выходит за граничные функции влияния температуры.

Результаты поверки аппаратуры оформляют протоколом. При положительных результатах поверки производят запись в паспорте о годности аппаратуры, и оформляется "Свидетельство о поверке". График ПФ температуры прикладывается к свидетельству о поверке аппаратуры.

При отрицательных результатах поверки аппаратура к эксплуатации не допускается.

Сведения о результатах поверки геофизической аппаратуры хранятся в базе данных метрологической службы (в метрологическом сервере) и передаются в технический отдел и интерпретационную службу геофизического предприятия по компьютерной сети или другим способом.

11.4 Показатели качества и достоверности поверки

Деятельность метрологической службы любого предприятия, в том числе и геофизического, также характеризуется показателями качества ее работы. Эти показатели отражают правильность и достоверность отбраковки негодных геофизических СИ в результате их поверки.

Методики проведения поверки СИ всегда предполагают использование эталонов и других вспомогательных технических средств,

вносящих в результаты поверки погрешность, называемую **погрешностью поверки**. Если бы погрешность поверки была равна нулю, то сравнивая оценки погрешности СИ с нормированным значением, всегда можно было бы сделать правильное заключение о ее годности или негодности. Качество поверки будет тем выше, чем ниже погрешность поверки и, следовательно, меньше ошибок в оценке годности поверяемой аппаратуры. Поэтому при определенном соотношении допускаемых погрешностей аппаратуры и эталона имеется вероятность $P \neq 0$ признать годной в действительности негодную и забраковать заведомо годную аппаратуру.

Для метрологической службы геофизической компании забраковать заведомо годную аппаратуру менее опасно, чем признать годной в действительности негодную аппаратуру. Поэтому при проведении поверки геофизических СИ будем рассматривать два показателя, отражающих качество поверки и достоверность годности аппаратуры.

Показатель качества поверки ($П_{кп}$) – это ***отношение допускаемой погрешности аппаратуры к допускаемой погрешности применяемого эталона***. Данный показатель отражает потенциальные возможности достоверной отбраковки негодных измерительных каналов геофизической аппаратуры. Так, например, при $П_{кп}$=10 потенциальные возможности достоверной отбраковки негодной аппаратуры выше, чем при $П_{кп}$=3. Для скважинной аппаратуры этот показатель бывает менее 2.

Вероятность годности ($P_г$) – это наибольшая вероятность годности поверяемой аппаратуры для наибольшей оценки поправки в каждой точке контроля. Вычисленное значение такой вероятности принимается за показатель достоверности поверки в каждой конкретной точке его метрологического контроля.

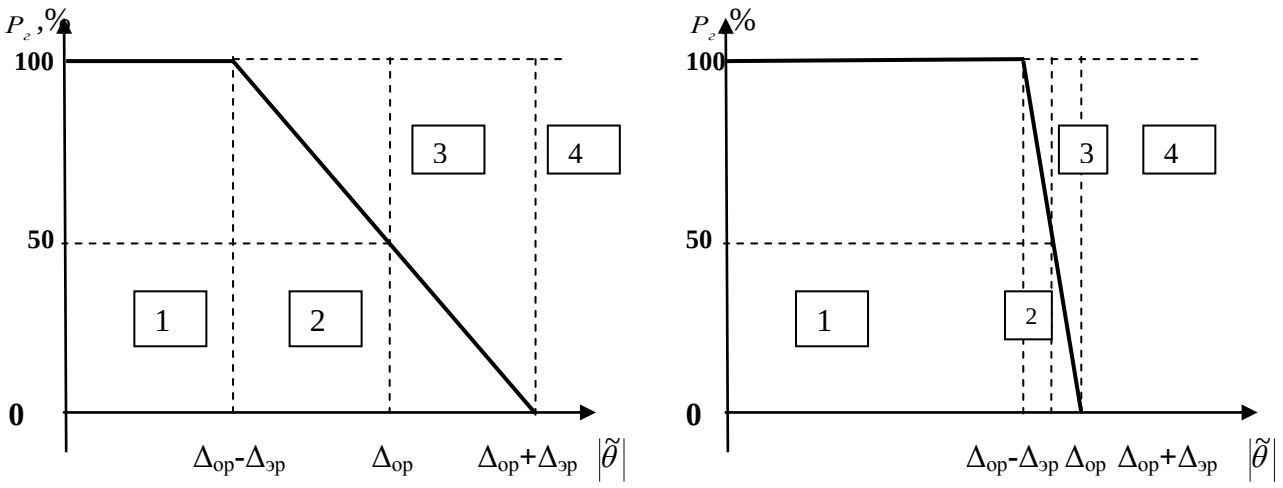
Функциональная связь вероятности годности $P_г$ с оценкой поправки $\tilde{\theta}$ поверяемой аппаратуры определяется формулой

$$P_г = \int_{\Delta_{ор}-\Delta_{эр}}^{\Delta_{ор}+\Delta_{эр}} \varphi(\tilde{\theta}) \cdot d\tilde{\theta}, \qquad (97)$$

где $\varphi(\tilde{\theta})$ – плотность распределения вероятности появления поправки к показаниям аппаратуры в интервале $\Delta_{ор} \pm \Delta_{эр}$; $\Delta_{ор}$ – допускаемая погрешность поверяемой аппаратуры; $\Delta_{эр}$ – допускаемая погрешность эталона [7].

Однако плотность распределения вероятности появления погрешности СИ в интервале $\Delta_{ор} \pm \Delta_{эр}$ определить экспериментально чрезвычайно трудно.

Для практических целей можно выбрать законы распределения плотности вероятности появления поправки к показаниям аппаратуры и эталона в интервале $\Delta_{ор} \pm \Delta_{эр}$ равномерными. Тогда композиция этих двух равномерных законов распределения поправок будет описываться треугольным законом распределения плотности вероятности совместного появления поправок поверяемого СИ и эталона в любой точке интервала $\Delta_{ор} \pm \Delta_{эр}$. Следовательно, кривую $P_г$ признания аппаратуры годной по результатам поверки с разными показателями ее качества можно представить следующими графиками функции годности, показанными (в положительной области) на рисунке 29.



а) Показатель качества $П_{кп} = 2$ б) Показатель качества $П_{кп} = 10$

а) при качестве поверки 2; б) при качестве поверки 10
Рисунок 29 – Графики функции "годности" СИ

При появлении оценки поправки $\tilde{\theta}$ поверяемой аппаратуры в каждой из четырех зон на этом рисунке делается заключение о ее годности в соответствии с таблицей 8.

Таблица 8 – Заключение о годности аппаратуры при разных значениях оценки поправки к его показаниям

Зона на рис. 29	Область нахождения оценки поправки СИ	Заключение о годности поверяемого СИ
1	$\lvert\tilde{\theta}\rvert \le \Delta_{ор} - \Delta_{эр}$	Заведомо годно
2	$\Delta_{ор} - \Delta_{эр} < \lvert\tilde{\theta}\rvert < \Delta_{ор}$	Возможно годно
3	$\Delta_{ор} < \lvert\tilde{\theta}\rvert < \Delta_{ор} + \Delta_{эр}$	Возможно негодно
4	$\lvert\tilde{\theta}\rvert \ge \Delta_{ор} + \Delta_{эр}$	Заведомо негодно

Нас интересует только зона 2 на рисунке 29 с областью нахождения оценки поправки в интервале $\Delta_{ор} - \Delta_{эр} < \lvert\tilde{\theta}\rvert < \Delta_{ор}$, для которого вероятность годности в % вычисляется по формуле

$$P_г = (1 - \frac{\lvert\tilde{\theta}\rvert - \Delta_{ор} + \Delta_{эр}}{2 \cdot \Delta_{эр}}) \cdot 100\% . \qquad (98)$$

Вероятность годности по результатам поверки СИ может быть легко вычислена и использована для принятия решения при оценке поправки, приближающейся к допускаемой погрешности.

Вероятность годности в зоне 2 может меняться от 100 до 50 %, а в зоне 3 – от 50 % до 0.

Показатель $P_г$ в зоне 3 нами не рассматривается, так как при $\lvert\tilde{\theta}\rvert > \Delta_{ор}$ поверитель сразу выполнит отбраковку СИ как "возможно негодного".

При равенстве оценки поправки допускаемой погрешности ($|\tilde{\theta}| = \Delta_{ор}$) всегда вероятность годности $P_г = 50\%$ при любом значении показателя качества поверки $П_{кп}$ ("фифти-фифти").

Таким образом, реальная погрешность СИ не превысит допускаемой погрешности с вероятностью 1 только в том случае, если оцененная поправка не превышает разности допускаемых погрешностей СИ и эталона (поправка находится в зоне 1). СИ признается 100 % годным.

Вопросы для самопроверки по второй главе

1 Какая деятельность называется метрологической?
2 Каковы отличительные признаки метрологической деятельности от измерительной деятельности?
3 Какие СИ называются индивидуально градуируемыми?
4 Как строится линейная КФ?
5 В чем особенность параболической КФ, построенной алгебраическим способом?
6 Как строится параболическая КФ статистическим способом?
7 Какие операции выполняют при калибровке средств измерений?
8 Как определяют аддитивную поправку к показаниям СИ?
9 Как определить СКО случайной абсолютной погрешности СИ?
10 Как строится ПФ от температуры?
11 Что означает словосочетание "*поверка СИ*"?
12 Какими показателями оценивается качество и достоверность поверки?
13 Какова структура поверочной схемы?
14 Как регулируется обеспечение единства измерений?
15 Как взаимосвязаны Росстандарт, метрологические институты, Центры стандартизации и метрологии, метрологические службы геофизического предприятия?
16 На какую сферу метрологической деятельности распространяется Российская система калибровки?

Заключение

1 Достоверная исходная измерительная информация является основой любой формы управления, анализа, прогнозирования, планирования, контроля и регулирования. Она важна в научных исследованиях, при изучении природных явлений, при оценке ресурсов любой страны с целью определения их запасов, контроля за их рациональным извлечением и использованием, а также с целью охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.

2 *Метрология является научной основой* двух видов человеческой деятельности – *измерительной* – с целью получения результата измерений величины и *метрологической* – с целью воспроизведения единицы величины и передачи ее средствам измерений на хранение при осуществлении измерительной деятельности. Деятельность геофизической компании связана с использованием средств измерений и включает измерительную и метрологическую деятельность. Метрологическую деятельность осуществляет метрологическая служба.

3 Метрология базируется на двух постулатах: 1) *истинное значение величины существует, оно постоянно и не может быть определено*; 2) *математическое ожидание показаний существует, оно постоянно и не может быть определено*. Значит, измеренное значение величины всегда отличается как от ее истинного значения, так и от математического ожидания показаний.

4 Под геофизическими измерениями в скважинах следует понимать всю совокупность операций, выполняемых с целью определения значений измеряемых параметров каждого выделенного пласта, пересеченного скважиной, и параметров этой скважины.

5 Неопределенность любых измерений обусловлена *систематическими и случайными эффектами*. *Неопределенность* отклонения измеренного значения величины от ее истинного значения и от математического ожидания показаний является общим свойством любых измерений, а *систематическая погрешность и случайная погрешность* являются количественными вероятностным показателями этих двух неопределенностей.

6 Под "*результатом геофизических измерений*" следует понимать не только единственное измеренное значение пласта или скважины, но и интервал, в котором может оказаться истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью. Ширина довери-

тельного интервала для истинного значения измеряемого параметра модели пласта и скважины служит показателем качества (точности, неопределенности) выполненных геофизических измерений.

7 Метрологическая деятельность в Российской Федерации регламентирована Федеральным законом "*Об обеспечении единства измерений*" № 102-ФЗ от 26 июня 2008 г. Геофизикам требуется документально подтверждать прослеживаемость единиц геофизических величин, используемых в любой измерительной деятельности, к государственным эталонам России.

8 Компетентность геофизической компании в оказании измерительных услуг зависит от компетентности ее метрологической службы в соответствии с требованиями ИСО 17025-2006.

9 *Сопоставимость* результатов геофизических измерений базируется на передаче единиц от эталонов средствам геофизической измерительной техники через *цепь последовательных калибровок или поверок*. Калибровка - определение действительных значений метрологических характеристик геофизических средств измерений. Поверка геофизической аппаратуры – это процедура, в результате которой находят подтверждение ее соответствия метрологическим требованиям.

10 Дальнейшее развитие геофизических измерений в скважинах следует ожидать в направлении создания стандартов на методики измерений конкретных параметров пластов и скважин с последующей их аттестацией применительно к конкретным нефтегазовым месторождениям. Требуется дальнейшее развитие и совершенствование как самой науки о скважинных измерениях, так и эталонов для скважинной геофизической аппаратуры.

Список литературы

1 *Артемьев, Б.Г.* Метрология и метрологическое обеспечение/ Б.Г.Артемьев.–М.: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2010. – 568 с.

2 *Бурдун, Г.Д.* Основы метрологии: учеб. пособие для вузов / Г.Д.Бурдун, Б.Н.Марков. – Изд. третье, перераб. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 286 с., ил.

3 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность методов и результатов измерений. Основные положения и определения.

4 ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения.

5 ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения.

6 ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения.

7 ГОСТ Р ИСО 5725-5-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения.

8 ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения.

9 *Земельман, М.А.* Метрологические основы технических измерений/ М.А.Земельман. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 228 с.

10 *Клаассен, К.Б.* Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике/К.Б.Клаассен; перевод с англ. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

11 *Кузнецов, В.А.* Метрология/ В.А.Кузнецов, Л.К.Исаев, И.А.Шайко. – М.: ФГУП "Стандартинформ", 2005. – 300 с.

12 *Лобанков, В.М.* Аттестация методик выполнения измерений параметров нефтегазовых залежей/ В.М.Лобанков// Метрологическая служба СССР. – Вып. 12. – 1983.

13 *Лобанков, В.М.* Вероятностный смысл погрешности измерений/ В.М.Лобанков// Законодательная и прикладная метрология. – 2012, № 2. – С. 54–60.

14 *Лобанков, В.М.* Основы метрологии геофизических измерений. Градуировка, калибровка и поверка скважинной геофизической аппаратуры: курс лекций/ В.М.Лобанков. – Уфа: Новый стиль, 2009. – 152 с.
15 *Лобанков, В.М.* Основы метрологии геофизических измерений: учеб. пособие/ В.М.Лобанков.–Уфа: Новый стиль. – 2011. – 144 с.
16 *Лобанков, В.М.* Метрология, стандартизация, сертификация: учеб. пособие/ В.М.Лобанков. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – 187 с.
17 Основные термины в области метрологии: словарь-справочник/ Юдин М.Ф., Селиванов М.Н., Тищенко О.Ф., Скороходов А.И.; под общей ред. Ю.В.Тарбеева. – М: Изд. Стандартов, 1989. – 113 с.
18 ПМГ 96-2009 ГСИ. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления.
19 РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
20 РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
21 РМГ 43-2001 ГСИ. Применение "Руководства по выражению неопределенности измерений".
22 РМГ 91-2009 ГСИ. Совместное использование понятий "погрешность измерения" и "неопределенность измерения".
23 Рекомендация МИ 1317-2004 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. – М.: ФГУП ВНИИМС, 2004. – 50 с.
24 Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: федер. Закон № 102-ФЗ: [принят 26 июня 2008 г.]. – М.: Стандартинформ, 2009.
25 Российская Федерация. Законы. О техническом регулировании: федер. закон №184-ФЗ [принят 27.2.2002, с изменениями от 01.05.2007]. – М.: Стандартинформ, 2007.
26 Руководство по выражению неопределенности измерения: пер. с англ. – СПб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.
27 Сергеев, А.Г. Метрология и метрологическое обеспечение: учебник/А.Г.Сергеев. – М.: Высшее образование, 2008. – 575 с. – (Основы наук).
28 Тойберг, П. Оценка точности результатов измерений: пер. с нем.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 88 с., ил.

29 *Широков, В.Н.* Метрология, стандартизация, сертификация: учебник/ В.Н.Широков, В.М.Лобанков.– М.: МАКС Пресс, 2008. – 498 с.
30 *Шишкин, И.Ф.* Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: учебник для вузов/ И.Ф.Шишкин. – 4-е изд .– СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
31 *Шишкин, И.Ф.* Теоретическая метрология. Часть 2. Обеспечение единства измерений: учебник для вузов/ И.Ф.Шишкин. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 240 с.
32 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), BIPM, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, IEC. – First edition, 1995.
33 *Rabinovich, Semyon G.* Evaluating measurement accuracy.A practical approach. –Springer Science+Business Media, LLC. – 2010.
34 *Taylor, John R.* An introduction to error analysis. The study of uncertainties in physical measurements/ Second edition. – University Science Book.-Sausalito, California. – 1997.
35 Theys P. Log data acquisition and quality control/ Second edition.– Editions Technip. – Paris, 1999. – 453 p.
36 VIM-3 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms, 3rd edition. – 2008.

Приложение

Краткий терминологический справочник

Абсолютная погрешность - погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины (absolute errorof a measurement).

Абсолютная погрешность средства измерений - погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой величины (absolute error of a measuring instrument).

Абсолютное измерение - измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант (absolutemeasurement).

Аддитивная величина - величина, разные значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены друг на друга (additivequantity).

Аттестация методик измерений - исследование и подтверждение соответствия методик измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям.

Бюджет неопределенности - отчет о неопределенности измерений, составляющих неопределенности, их вычислении и суммировании (uncertainty budget)

Вариация, вызванная влияющей величиной - разность показаний для данного значения измеряемой величины, обусловленная тем, что влияющая величина принимает последовательно два разных значения (variation due to an influence quantity).

Вариация показаний - разность показаний измерительного прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны больших и меньших значений измеряемой величины.

Время отклика (при скачкообразном воздействии) - интервал времени от момента, когда значение величины на входе средства измерений или измерительной системы скачкообразно изменяется до определенного уровня (значения), до момента, когда соответствующее показание средства измерений или измерительной системы достигает установившегося конечного значения и остается в заданных пределах (step response time).

Величина - свойство материального объекта или явления, общее в качественном отношении для многих объектов или явлений, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них (quantity).

Вероятность охвата - вероятность того, что совокупность истинных значений измеряемой величины находится в указанном интервале охвата (coverage probability).

Влияющая величина - величина, которая при прямом измерении не влияет на величину, которую фактически измеряют, но влияет на соотношение между показанием и результатом измерения (influence quantity)

Воспроизведение единицы (величины) - совокупность операций по материализации единицы величины с помощью первичного эталона.

Воспроизведение основной единицы - воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру величины в соответствии с определением единицы.

Воспроизведение производной единицы - воспроизведение единицы величины в соответствии с уравнением связи между данной производной единицей и основными единицами.

Воспроизводимость (измерений) - прецизионность измерений в *условиях воспроизводимости* измерений (reproducibility).

Вторичный эталон - эталон, получающий единицу величины или шкалу измерений непосредственно от первичного эталона данной единицы или шкалы (secondary measurement standard).

Действительное значение (величины) - значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него (conventional true value of a quantity).

Действительное значение меры - значение величины, приписанное мере на основании ее калибровки или поверки (conventional true value of a material measure).

Детектор - техническое средство или вещество, которое указывает на наличие определенного свойства объекта измерения при превышении порогового значения соответствующей величиной (detector).

Дефинициальная неопределенность - составляющая неопределенности измерений, являющаяся результатом ограниченной детализации в определении измеряемой величины (definitional uncertainty).

Диаграмма калибровки - графическое выражение соотношения между показанием и соответствующим результатом измерения (calibration diagram).

Диапазон измерений - множество значений величин одного рода, которые могут быть измерены данным средством измерений или измерительной системой с указанными инструментальной неопределенностью или указанными показателями точности при определенных условиях (measuring interval).

Диапазон показаний - область значений шкалы измерительного прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы (indication interval).

Динамическая погрешность - разность между погрешностью средства измерений в статическом и динамическом режиме, соответствующей значению (*истинному значению*) величины в данный момент времени.

Динамическая поправка - разность между показанием средства измерений в статическом и динамическом режиме в данный момент времени.

Динамическое измерение - измерение в режиме использования средства измерений, связанное с изменениями условий (факторов) за время проведения измерительного эксперимента, которые влияют на результат измерения (оценку измеряемой величины), в т. ч. изменение измеряемой величины за время измерения (dynamic measurement).

Дифференциальный метод измерений - метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, при котором измеряется разность между этими двумя величинами (differential method of measurement).

Дополнительная погрешность - составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений (complementary error of a measuring instrument).

Единица величины - величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное 1, определяемая и принимаемая по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин (measurement unit).

Единство измерений - состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы (uniformity of measurement).

Естественный эталон - эталон, основанный на присущих и воспроизводимых свойствах материального объекта или явления (intrinsic measurement standard).

Значение величины - выражение размера величины в виде некоторого числа принятых единиц, или чисел, баллов по соответствующей шкале измерений (value of a quantity).

Зона нечувствительности средства измерений; мертвая зона - диапазон значений измеряемой величины, в пределах которого ее изменения не вызывают значимого изменения показания средства измерений (dead band).

Избирательность - свойство средства измерений или измерительной системы, применяемой согласно установленной методике измерений для получения измеренных значений одной или нескольких измеряемых величин, заключающееся в независимости значений этих величин друг от друга и от влияющих величин объекта измерения (selectivity).

Измерение (величины) - процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине (VIM 3); процесс экспериментального получения интервала для истинного значения величины, в котором оно могло бы оказаться с заданной вероятностью (measurement).

Измеренное значение (величины) - значение величины, которое представлено в результате измерений(measured quantity value, measured value).

Измерительная задача - задача, заключающаяся в определении значения величины путем ее измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений.

Измерительная информация - информация о значении величины, входящей в модель измерений (measurement information).

Измерительная система - совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту (measuring system).

Измерительные принадлежности - вспомогательные средства, служащие для обеспечения необходимых условий для выполнения измерений с требуемой точностью.

Измерительный преобразователь - средство измерений (или его часть), служащее для получения и преобразования информации об измеряемой величине в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи (measuring transducer).

Измерительный прибор - средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия (indicating measuring instrument).

Измеряемая величина - величина, подлежащая измерению (measurand).

Инструментальная неопределенность - составляющая неопределенности измерений, обусловленная применяемым средством измерений или измерительной системой (instrumental measurement uncertainty).

Инструментальная погрешность - составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений (instrumental error).

Инструментальное смещение - разность между средним значением повторных показаний и опорным значением величины (instrumental bias).

Инструментальный дрейф - непрерывное или ступенчатое изменение показаний во времени, вызванное изменениями метрологических характеристик средства измерений (instrumental drift).

Интервал охвата - интервал, основанный на имеющейся информации, который содержит совокупность истинных значений измеряемой величины с заданной вероятностью (coverage interval).

Истинное значение (величины) - значение величины, которое соответствует определению измеряемой величины (true value).

Исходный эталон - эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в стране или группе стран, в регионе, министерстве (ведомстве), организации, предприятии или лаборатории), передающий единицу величины или шкалу измерений подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений (reference measurement standard).

Калибратор - эталон, используемый при калибровке или поверке (calibrator).

Калибровочная иерархия - последовательность калибровок, начиная от основы для сравнения и кончая средством измерения, причем в этой последовательности результат каждой калибровки зависит от результата предыдущей калибровки (calibration hierarchy).

Калибровочная кривая; калибровочная функция - выражение соотношения между показанием и соответствующим измеренным значением величины (calibration curve).

Калибровка средств измерений - совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона, с целью определения метрологических характеристик этого средства измерений (VIM 3). *Калибровка* - совокупность операций, выполняемых с целью определения действительных значений метрологических характеристик средства измерений, включая построение шкалы или калибровочной функции (calibration).

Класс точности - обобщенная характеристика данного типа средств измерений, отражающая их уровень точности и выражаемая точностными характеристиками средств измерений (accuracy class).

Компаратор - средство измерений, предназначенное для сличения мер однородных величин, измерительных преобразователей и измерительных приборов (comparator).

Комплектная поверка- поверка, при которой определяют метрологические характеристики средства измерений, присущие ему как единому целому.

Косвенное измерение - измерение, при котором искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной (indirect measurement).

Коэффициент охвата - число, большее, чем один, на которое умножают суммарную стандартную неопределенность измерений для получения расширенной неопределенности измерений (VIM 3) (coverage factor).

Локальная поверочная схема - поверочная схема, распространяющаяся на эталоны и средства измерений данной величины, применяемые в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (в организации), и утверждаемая в качестве нормативного документа организацией (учреждением, подразделением - для отдельного предприятия), отвечающей за обеспечение единства измерений (local hierarchy scheme).

Максимальная допускаемая погрешность - максимальное значение погрешности измерения, разрешенное спецификацией или нормативными документами для данного измерения (maximum permissible measurement error).

Международная система величин - система величин, основанная на подмножестве семи основных величин: длины, массы, времени, электрического тока, термодинамической температуры, количества вещества и силы света (International Systemof Quantities, ISQ).

Международная система единиц - система единиц, основанная на Международной системе величин, вместе с наименованиями и обозначениями, а также набором приставок и их наименованиями и обозначениями вместе с правилами их применения, принятая Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) (InternationalSystemofUnits, SI).

Международный эталон - эталон, который признан всеми государствами, подписавшими международное соглашение, и предназначен для всего мира (international measurement standard).

Мера - средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями (material measure).

Метод замещения - метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины (substitution method of measurement).

Метод измерений - прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей или соотнесения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений(measurement method).

Метод сравнения (с мерой) - метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Методика (выполнения) измерений - установленная логическая последовательность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений в соответствии с принятым методом измерений (measurement procedure).

Метрологическая исправность - состояние средства измерений, при котором все его нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям.

Метрологическая надежность - надежность средства измерений в части сохранения его метрологической исправности.

Метрологическая совместимость - свойство множества результатов измерений для определенной измеряемой величины, при котором абсолютное значение разности любой пары измеренных значений величины, полученное из двух различных результатов измерений, меньше, чем некоторое выбранное кратное стандартной неопределенности измерений этой разности (metrological compatibility of measurement results).

Метрологический отказ - выход метрологической характеристики средства измерений за установленные пределы.

Метрологическая прослеживаемость - свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений (metrological traceability).

Метрологическая прослеживаемость к единице - метрологическая прослеживаемость, когда основой для сравнения является определение единицы измерения через ее практическую реализацию (metrological traceability to an unit).

Метрологическая сопоставимость - сопоставимость результатов измерений для величин данного рода, которые метрологически прослеживаются к одной и той же основе для сравнения (metrological comparability).

Метрологическая характеристика - характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений (metrological characteristic of measuring instrument).

Метрологическая экспертиза документации - анализ и оценивание экспертами-метрологами правильности применения метрологических требований, правил и норм, в первую очередь связанных с единством измерений.

Метрология - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности (metrology).

Модель измерений; уравнение измерений - уравнение связи между величинами в конкретной измерительной задаче (measurement model).

Национальный эталон - эталон, признанный национальными органами власти для использования в государстве или экономике в качестве исходного для страны (national standard).

Неопределенность измерений - неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации (VIM 3) (measurement uncertainty).

Неопределенность измерений нуля - неопределенность измерений, когда заданное значение измеряемой величины равно нулю (null measurement uncertainty).

Номинальный диапазон показаний - множество значений величины между округленными или приближенными начальным и конечным значениями шкалы, достижимыми при определенной регулировке средства измерений, и используемое для обозначения данной регулировки (nominal indication interval).

Номинальное значение величины - округленное или приближенное значение величины, приписанное средству измерений, которым следует руководствоваться при его применении (nominal quantity value).

Нормальное значение - значение влияющей величины, к которому приводятся результаты измерений одной и той же величины, выполненные в разных условиях.

Нормальные условия - условия измерений, предписанные для оценивания характеристик средства измерений или измерительной системы или для сравнения результатов измерений (reference operating condition; reference condition).

Нормированные условия измерений; рабочие условия измерений - условия измерений, которые должны выполняться во время измерения для того, чтобы средство измерений или измерительная система функционировали в соответствии со своим назначением (rated operating condition).

Нормируемые метрологические характеристики - совокупность метрологических характеристик данного типа средств измерений, устанавливаемая нормативными документами на средства измерений (rated metrological characteristics of measuring instrument type).

Нулевой метод - метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на средство сравнения доводят до нуля (null method of measurement).

Объект измерения - материальный объект или явление, которые характеризуются одной или несколькими измеряемыми и влияющими величинами (measurement object).

Опорное значение (величины) - значение величины, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода(reference quantity value,reference value).

Основная величина - одна из величин подмножества, условно выбранного для данной системы величин так, что никакая из величин этого подмножества не может выражаться через другие величины (base quantity).

Основная единица - единица измерения, принятая по соглашению для основной величины (base unit).

Основная погрешность - погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях(intrinsic error of a measuring instrument).

Относительная погрешность - погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к опорному значению измеряемой величины (relative error).

Относительная погрешность средства измерений - погрешность средства измерений, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к опорному значению измеряемой величины (relative error of a measuring instrument).

Относительное измерение - измерение отношения одноименных величин или функций этого отношения (relative measurement).

Оценивание неопределенности по типу А - оценивание составляющей неопределенности измерений путем статистического анализа измеренных значений величины, получаемых при определенных условиях измерений (type A evaluation of measurement uncertainty).

Оценивание неопределенности по типу В - оценивание составляющей неопределенности измерений способами, отличными от оценивания неопределенности измерений по типу А (type B evaluation of measurement uncertainty)

Первичная поверка - поверка, выполняемая при выпуске средства измерений из производства или после ремонта, а также при ввозе средства измерений из-за границы(initial verification of measurement instrument).

Первичный эталон - эталон, основанный на использовании первичной референтной методики измерений или созданный как артефакт, выбранный по соглашению (primary measurement standard).

Передача единицы величины - приведение размера величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой или хранимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

Передача шкалы - совокупность операций, имеющих целью воссоздание шкалы измерений (или ее участка) в соответствии с ее спецификацией.

Периодическая поверка - поверка средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные интервалы времени между поверками (periodic verification).

Первичная референтная методика измерений - референтная методика измерений, которая используется для получения результата измерения без сравнения с эталоном единицы величины того же рода (primary reference measurement procedure).

Поверка (средств измерений) - установление официально уполномоченным органом пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям (verificationof a measuring instrument).

Поверочная схема - иерархическая структура, устанавливающая соподчинение эталонов, участвующих в передаче единицы или шкалы измерений от исходного эталона средствам измерений (с указанием методов и погрешностей при передаче), утверждаемая в установленном порядке в виде нормативного документа (hierarchy scheme).

Повторяемость *(сходимость)* ***измерений*** - прецизионность измерений в условиях повторяемости измерений (repeatability).

Погрешность - показатель точности (неопределенности) измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между измеренным и истинным значением величины с заданной вероятностью (measurement error); *разность между измеренным значением величины и опорным значением величины* - определение из РМГ 29-2013.

Погрешность в контрольной точке - погрешность средства измерений или измерительной системы для заданного значения измеряемой величины (datum measurement error).

Погрешность метода - составляющая погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений (error of method).

Погрешность метода передачи единицы величины; погрешность метода поверки; погрешность метода калибровки - составляющая погрешности измерений при передаче единицы величины, обусловленная несовершенством применяемого метода поверки или калибровки.

Погрешность нуля - погрешность средства измерений в контрольной точке, когда заданное значение измеряемой величины равно нулю (zero error).

Погрешность передачи единицы - погрешность измерений при передаче единицы величины, включающая погрешности метода передачи единицы величины и эталона, от которого осуществляется передача, а также случайные погрешности эталона (средства измерений), которому осуществляется передача единицы величины.

Показание - значение величины, формируемое средством измерений или измерительной системой (indication).

Порог чувствительности - наименьшее значение изменения величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством измерения (discrimination threshold).

Поправка - значение величины, вводимое в показание с целью уменьшения систематической погрешности - компенсация оцененного систематического эффекта (correction).

Поправочный множитель - числовой коэффициент, на который умножают показание с целью уменьшения влияния систематической погрешности (correction factor).

Порядковая величина - величина, определенная в соответствии с принятыми по соглашению методом измерений или методикой измерений, для которой может быть установлено, в соответствии с ее размером, общее порядковое соотношение с другими величинами того же рода, но для которой не применимы алгебраические операции над этими величинами (ordinal quantity).

Поэлементная поверка - поверка, при которой значения метрологических характеристик средств измерений устанавливаются по метрологическим характеристикам его элементов или частей.

Правильность измерений - близость среднего арифметического бесконечно большого числа повторно измеренных значений величины к опорному значению величины (measurement trueness).

Предельные условия - условия измерений, характеризуемые экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерений или измерительная система может выдержать без разрушений и ухудшения метрологических характеристик, если они впоследствии будут использоваться в своих нормированных условиях измерения (limiting operating condition).

Пределы допускаемой погрешности (допускаемая погрешность) - наибольшие значения погрешности средства измерений, устанавливаемое нормативным документом для данного типа средств измерений, при котором оно еще признается метрологически исправным (limit of error).

Прецизионность измерений - близость между показаниями или измеренными значениями величины, полученными при повторных измерениях для одного и того же или аналогичных объектов при заданных условиях (measurement precision).

Приведенная погрешность - погрешность средства измерений, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к нормирующему значению величины (reduced error of a measuring instrument).

Принятое значение (величины) - значение величины, по соглашению приписанное величине для данной цели (conventional value).

Принцип измерений - явление материального мира, положенное в основу измерения (measurement principle).

Производная величина - величина, входящая в систему величин и определяемая через основные величины этой системы (derived quantity).

Прямое измерение - измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений (direct measurement).

Рабочий эталон - эталон, предназначенный для передачи единицы величины или шкалы измерений средствам измерений (working measurement standard).

Разрешающая способность измерительного прибора - наименьшая разность между показаниями, которая может быть заметно различима (resolution of a display in gdevice).

Разрешение - наименьшее изменение измеряемой величины, которое является причиной заметного изменения соответствующего показания (resolution).

Регулировка - совокупность операций, которые применяются к средству измерений для того, чтобы обеспечить требуемые показания, соответствующие заданным значениям величины, подлежащей измерению (adjustment of a measuring instrument).

Размер величины - количественная определенность величины, присущая конкретному материальному объекту или явлению (size of quantity).

Расширенная неопределенность - произведение суммарной стандартной неопределенности и коэффициента охвата большего, чем число один (expanded uncertainty).

Результат измерения (величины) - множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией (VIM 3); интервал для истинного значения величины, в котором оно могло бы оказаться с заданной вероятностью (measurement result).

Референтная методика измерений - методика измерений, принятая для получения результатов измерений, которые могут быть использованы для оценки правильности измеренных значений величины, полученных по другим методикам измерений величин того же рода, а также для калибровки или для определения характеристик стандартных образцов (reference measurement procedure).

Система величин - согласованная совокупность величин и уравнений связи между ними, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины условно принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин (system of quantities).

Систематическая погрешность измерений - показатель точности измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между средним измеренным и истинным значением величины с заданной вероятностью (systematic measurement error).*Составляющая погрешности измерений, принимаемая за постоянную или закономерно изменяющуюся* (определение из РМГ 29-2013).

Систематическая погрешность средства измерений - показатель точности средства измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между средним значением показаний и истинным значением величины с заданной вероятностью (systematic error of a measuring instrument). *Составляющая погрешности средства измерений, принимаемая за постоянную или закономерно изменяющуюся* (определение из РМГ 29-2013).

Сличение эталонов - установление соотношения между результатами измерений при воспроизведении и передаче единицы измерения или шкалы измерений данными эталонами одного уровня точности (comparison of measurement standards).

Случайная погрешность измерений - показатель точности (неопределенности) измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между средним измеренным значением величины и математическим ожиданием измеренных значений с заданной вероятностью (random measurement error). *Составляющая погрешности измерений, изменяющаяся случайным образом (*определение из РМГ 29-2013).

Случайная погрешность средства измерений - показатель точности средства измерений, выраженный интервалом, в котором могла бы оказаться разность между средним значением показаний и математическим ожиданием показаний с заданной вероятностью (random error of a measuring instrument). *Составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся случайным образом (*определение из РМГ 29-2013).

Совместные измерения - проводимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для определения зависимости между ними.

Совокупные измерения - проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Справочные данные - данные, относящиеся к свойству материального объекта или явления или к системе компонентов известного состава или структуры, полученные из идентифицированного источника, критически оцененные и обоснованные по точности (reference data).

Среднее квадратическое отклонение; стандартное отклонение - параметр функции распределения измеренных значений или показаний, характеризующий их рассеивание и равный положительному корню квадратному из дисперсии этого распределения (standard deviation).

Средства измерительной техники - обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений.

Средство измерений - техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики (measuring instrument).

Средство сравнения - техническое средство или определенная среда, посредством которых возможно выполнять сравнение друг с другом мер однородных величин или показания измерительных приборов (transfer measurement device).

Стабильность - свойство средства измерений, отражающее неизменность во времени его метрологических характеристик (stability).

Стандартная неопределенность - неопределенность измерений, выраженная в виде стандартного отклонения(standard measurement uncertainty).

Стандартные справочные данные - справочные данные, опубликованные признанной авторитетной организацией (standard reference data).

Стандартный образец - материал, достаточно однородный и стабильный в отношении определенных свойств для того, чтобы использовать его при изме-

рении или при оценивании качественных свойств в соответствии с предполагаемым назначением (reference material).

Статическая погрешность - погрешность средства измерений, применяемого для измерения постоянной величины.

Статическое измерение - измерение величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения (static measurement).

Суммарная стандартная неопределенность - стандартная неопределенность измерений, которую получают суммированием отдельных стандартных неопределенностей измерений, связанных с входными величинами в модели измерений (combined standard uncertainty).

Тип средства измерений - совокупность средств измерений одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации (pattern of a measuring instrument).

Точность - качество средства измерений, отражающее близость к нулю его погрешности (accuracy of a measuring instrument).

Точность измерений - близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины (measurement accuracy).

Точностные характеристики - совокупность метрологических характеристик средства измерений, влияющих на точность измерения (accuracy characteristics of a measuring instrument).

Условия воспроизводимости (измерений) - один из наборов условий измерений, включающий разные местоположения, разные средства измерений, участие разных операторов и выполнение повторных измерений на одном и том же или аналогичных объектах (reproducibility conditions).

Условия повторяемости (измерений) - один из наборов условий измерений, включающий применение одной и той же методики измерений, того же средства измерений, участие тех же операторов, те же рабочие условия, то же местоположение и выполнение повторных измерений на одном и том же или подобных объектах в течение короткого промежутка времени (repeatability conditions).

Условия стабильности измерений - условия измерений, при которых метрологические характеристики, установленные при калибровке средства измерений или измерительной системы, сохраняются в процессе эксплуатации (steady state conditions).

Установка - совокупность функционально объединенных и расположенных в одном месте мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких величин (measuring installation).

Фоновое показание - показание при условии, что представляющая интерес измеряемая величина не вносит вклад в это показание (blank indication).

Функция измерений - зависимость величин модели измерений, используемая для получения измеренного значения выходной величины по известным значениям входных величин.

Целевая неопределенность - верхняя граница неопределенности измерений, заранее установленная, исходя из предполагаемого использования результатов измерений (VIM 3) (target measurement uncertainty).

Цена деления шкалы - разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений (scale interval).

Чувствительность - отношение изменения показаний средства измерения к вызывающему его изменению измеряемой величины (sensitivity).

Чувствительный элемент; первичный измерительный преобразователь; сенсор - измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует материальный объект или явление, являющееся носителем величины, подлежащей измерению (sensor).

Шкала - часть средства измерений, представляющая собой упорядоченный набор меток вместе со значениями соответствующей величины (scale of a measuring instrument).

Шкала (значений) величины или шкала измерений - упорядоченная совокупность значений величины, служащая исходной основой для измерений данной величины (quantity-value scale, measurement scale).

Эталон (единицы величины или шкалы измерений) - средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений (measurement standard, etalon).

Эталон сравнения - эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом (transfer standard).

Об авторе

Лобанков Валерий Михайлович – профессор кафедры "Геофизические методы исследований" Уфимского государственного нефтяного технического университета. Окончил Уфимский авиационный институт (1971) по специальности "Промышленная электроника", кандидат технических наук по специальности "Метрология и метрологическое обеспечение" (1985), доктор технических наук по специальности "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых" (2008).

Является одним из создателей научных основ метрологии и метрологического обеспечения геофизических измерений. Под его руководством создавалась метрологическая служба промысловой геофизики Министерства нефтяной промышленности СССР (1975-1991).

В настоящее время проводит исследования в области геофизических измерений параметров пластов и скважин, разработку эталонов для скважинной геофизической аппаратуры и метрологических стандартов. Аттестован Росстандартом в качестве эксперта Системы сертификации продукции и услуг ГОСТ Р по специальности "Скважинная геофизическая аппаратура и оборудование". Является членом диссертационного совета, ученое звание – профессор.

Адрес: 450080, г. Уфа, ул. Менделеева, д. 195, к. 226.
Телефакс: (347) 228-25-77Моб.:8-917-43-43-728
E.mail: Lobankov-vm@mail.ru

Учебное издание

Лобанков Валерий Михайлович

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Редактор М.Е. Галина

Подписано в печать 2019. Бумага офсетная. Формат 60x84 $^{1}/_{16}$
Ус. печ. л. 11,75. Тираж 150. Заказ .

Издательство
Уфимского государственного нефтяного технического университета

Адрес издательства:
450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1