ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р МЭК 62209-1— 2008

Воздействие на человека радиочастотных полей от ручных и располагаемых на теле беспроводных устройств связи

МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ПРОЦЕДУРЫ

Часть 1

Порядок определения коэффициента удельного поглощения энергии для ручных устройств, используемых в непосредственной близости к уху (полоса частот от 300 МГц до 3 ГГц)

IEC 62209-1:2005
Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices — Human models, instrumentation and procedures — Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz)
(IDT)

Издание официальное

БЗ 8—2008/224

Москва
Стандартинформ
2009

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184 -ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» на основе аутентичного перевода стандарта, указанного в пункте 4, выполненного Некоммерческим партнерством «Сообщество по обеспечению мобильных коммуникаций»

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 декабря 2008 г. № 784-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту МЭК 62209-1:2005 «Воздействие на человека радиочастотных полей от ручных и располагаемых на теле беспроводных устройств связи. Модели человека, измерительные приборы и процедуры. Часть 1. Порядок определения коэффициента удельного поглощения энергии для ручных устройств, используемых в непосредственной близости к уху (полоса частот от 300 МГц до 3 ГГц)» (IEC 62209-1:2005 «Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices — Human models, instrumentation and procedures — Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz)»).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации, сведения о которых приведены в дополнительном приложении К

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомления и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

© Стандартинформ, 2009

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 1
4 Обозначения и сокращения . . . 7
4.1 Физические величины . . . 7
4.2 Константы . . . 7
4.3 Сокращения . . . 7
5 Характеристики измерительной системы . . . 8
5.1 Общие требования . . . 8
5.2 Характеристики манекена (оболочка и жидкость) . . . 8
5.3 Характеристики оборудования, предназначенного для измерения коэффициента удельного поглощения энергии . . . 11
5.4 Характеристики сканирующей системы . . . 12
5.5 Характеристики держателя испытуемого устройства . . . 12
5.6 Измерение диэлектрических свойств жидкости . . . 12
6 Протокол испытаний при оценке коэффициента удельного поглощения энергии . . . 12
6.1 Подготовка к измерениям . . . 12
6.2 Проводимые испытания . . . 17
6.3 Порядок проведения измерений . . . 18
6.4 Последующая обработка результатов измерений коэффициента удельного поглощения энергии . . . 20
7 Оценка неопределенности измерений . . . 21
7.1 Общие принципы . . . 21
7.2 Составляющие неопределенности измерений . . . 22
7.3 Оценка неопределенности измерений . . . 32
8 Протокол испытаний . . . 35
8.1 Общие положения . . . 35
8.2 Разделы протокола испытаний . . . 35
Приложение A (обязательное) Характеристики манекена . . . 36
Приложение B (обязательное) Градуировка (линейность, изотропия, чувствительность) оборудования и оценка неопределенности измерений . . . 41
Приложение C (обязательное) Методы обработки результатов измерений и оценка неопределенности измерений . . . 53
Приложение D (обязательное) Валидация системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии . . . 57
Приложение E (справочное) Межлабораторные сравнительные испытания . . . 63
Приложение F (справочное) Определение системы координат манекена и системы координат испытуемого устройства . . . 64
Приложение G (справочное) Диполи, используемые при валидации . . . 65
Приложение H (справочное) Плоский манекен . . . 67
Приложение I (справочное) Рекомендуемые составы жидкостей, эквивалентных ткани головы . . . 69
Приложение J (справочное) Измерение диэлектрических свойств жидкостей и оценка неопределенности измерений . . . 71
Приложение K (обязательное) Сведения о соответствии национальных стандартов Российской Федерации ссылочным международным стандартам . . . 79
Библиография . . . 80

Предисловие к МЭК 62209-1:2005

1 Международная электротехническая комиссия (МЭК) является всемирной организацией по стандартизации, объединяющей все национальные электротехнические комитеты (национальные комитеты МЭК). Цель МЭК — способствовать международному сотрудничеству во всех вопросах стандартизации в области электроники и электротехники. Для достижения этой цели, помимо осуществления другой деятельности, МЭК публикует международные стандарты, технические спецификации, технические отчеты, общедоступные технические условия и руководства (в дальнейшем именуемые публикациями МЭК). Их подготовка поручается техническим комитетам, в работе которых имеет право участвовать любой заинтересованный национальный комитет МЭК. Связанные с МЭК международные правительственные и неправительственные организации также участвуют в этой работе. МЭК тесно сотрудничает с Международной организацией по стандартизации (ИСО), действуя в соответствии с условиями, которые предусмотрены соглашениями между двумя организациями.

2 Официальные решения и соглашения МЭК по техническим вопросам воплощают, насколько это возможно, международное единство мнений по соответствующей проблематике, поскольку в состав каждого технического комитета входят представители всех заинтересованных национальных комитетов МЭК.

3 Публикации МЭК имеют форму рекомендаций международному сообществу и именно в этом качестве принимаются национальными комитетами МЭК. При этом, несмотря на все усилия, направленные на обеспечения технической точности публикаций, МЭК не может нести ответственности за правильность их применения и интерпретации пользователями.

4 В интересах международной унификации национальные комитеты МЭК обязуются максимально полно отражать публикации МЭК в своих национальных и региональных стандартах. Любые расхождения между публикацией МЭК и соответствующим национальным или региональным стандартом должны быть точно обозначены в последнем.

5 МЭК не имеет собственного знака соответствия и не несет ответственности за заявления о соответствии того или иного оборудования требованиям публикаций МЭК.

6 Во всех случаях практического применения необходимо использовать последнее издание настоящей публикации.

7 МЭК, ее директора, сотрудники, служащие и представители, включая отдельных экспертов, членов технических комитетов и членов национальных комитетов МЭК, не несут ответственности за случаи травматизма, порчи имущества и иного ущерба любого рода, будь то прямого или косвенного, а также за издержки (включая судебные) и расходы, возникающие в связи с изданием, применением или принятием за основу данной или любой другой публикации МЭК.

8 Следует обратить внимание на ссылки на нормативные документы, приводимые в настоящей публикации. Использование этих ссылок необходимо для правильного применения настоящей публикации.

9 Необходимо учитывать, что некоторые части настоящей публикации МЭК могут быть предметом патентного права. МЭК не несет ответственности за идентификацию таких частей, будь то по отдельности или в совокупности.

Международный стандарт МЭК 62209-1 подготовлен техническим комитетом МЭК 106 «Методы измерения электрических, магнитных и электромагнитных полей, способных оказывать воздействие на организм человека».

Текст настоящего стандарта составлен на основе следующих документов:

FDIS	Протокол голосования
106/84/FDIS	106/88/RVD

Полная информация по результатам голосования в связи с принятием настоящего стандарта содержится в протоколе голосования, упомянутом в приведенной выше таблице.

Проект настоящей публикации подготовлен в соответствии с Директивами ИСО / МЭК, часть 2.

Согласно решению комитета, содержание настоящей публикации будет оставаться неизменным вплоть до наступления даты ее повторного утверждения, которая указана на веб-сайте МЭК, в соответствующей части раздела gost.e-ecolog.ru После наступления указанной даты настоящая публикация будет:

- повторно утверждена;
- отозвана;
- заменена переработанным изданием или
- дополнена поправками.

Введение к МЭК 62209-1:2005

Международные группы экспертов, представляющие технический комитет 106 Международной электротехнической комиссии (МЭК ТК 106), Рабочую группу 1 Технического комитета 106х Европейского комитета по стандартизации в области электротехники (СЕНЕЛЕК ТК 106х РГ 1) и Комитет по координации стандартов 34 Института инженеров по электротехнике и электронике (ИИЭЭ), провели совместную работу, направленную на гармонизацию своих разработок, в частности: подготовленного Проектной группой 62209 Технического комитета 106 МЭК документа «Порядок измерения коэффициента удельного поглощения энергии для ручных мобильных телефонов, работающих в полосе частот от 300 МГц до 3 ГГц» и разработанного Комитетом по координации стандартов 34 ИИЭЭ стандарта «Рекомендации по определению пространственно усредненного значения коэффициента удельного поглощения энергии в голове человека для беспроводных устройств связи: методы измерений» [22][1)].

В ходе проведенной работы основные усилия были направлены на гармонизацию этих двух стандартов.

[1)] Цифры в квадратных скобках соответствуют перечислениям в библиографии.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Воздействие на человека радиочастотных полей от ручных и располагаемых на теле беспроводных устройств связи

МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ПРОЦЕДУРЫ

Часть 1

Порядок определения коэффициента удельного поглощения энергии для ручных устройств, используемых в непосредственной близости к уху (полоса частот от 300 МГц до 3 ГГц)

Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices. Human models, instrumentation and procedures. Part 1. Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz)

Дата введения — 2009—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на все создающие электромагнитное поле (ЭМП) устройства, включая мобильные телефоны, радиотелефоны и т.д., использование которых предполагает нахождение их излучающей части в непосредственной близости к голове возле уха в полосе частот от 300 МГц до 3 ГГц.

Настоящий стандарт устанавливает методы измерений, проводимых для демонстрации соответствия таких устройств установленным для них нормам коэффициента удельного поглощения энергии (*SAR*).

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие международные стандарты:

Руководство ИСО/МЭК:1995 Руководство по выражению неопределенности измерений

ИСО/МЭК 17025:2005 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **коэффициент ослабления** (attenuation coefficient): Числовой коэффициент, позволяющий учитывать ослабление ЭМП в результате наличия ткани головы или тела человека между источником ЭМП и указанной точкой.

3.2 **средняя (по времени) поглощаемая мощность** [average (temporal) absorbed power] $\bar{P}_{avg}$, Вт: Значение средней поглощаемой мощности, вычисляемое по формуле

$$\bar{P}_{avg} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt,$$

где t_2 — время окончания воздействия, с;

t_1 — время начала воздействия, с;

$t_2 - t_1$ — продолжительность воздействия, с;

$P(t)$ — мгновенное значение поглощенной мощности, Вт.

Издание официальное

3.3 **осевая изотропия** (axial isotropy): Максимальное отклонение значения коэффициента удельного поглощения энергии (*SAR*) при вращении оболочки/корпуса измерительного зонда вокруг главной оси в момент воздействия на зонд опорной волны, распространяющейся вдоль главной оси зонда.

3.4 **основное ограничение** (basic restriction): Физическая величина, принятая для установления допустимого воздействия на человека изменяющихся во времени электрических, магнитных и электромагнитных полей, непосредственно определяемая их влиянием на здоровье человека.

Примечание — В пределах полосы частот, установленной в настоящем стандарте, физической величиной, принятой в качестве основного ограничения, является коэффициент удельного поглощения энергии (*SAR*).

3.5 **граничный эффект (зонда)** [boundary effect (probe)]: Изменение чувствительности зонда, предназначенного для измерения напряженности электрического поля, при его нахождении вблизи (менее одного диаметра наконечника зонда) границы среды.

3.6 **комплексная диэлектрическая проницаемость** (complex permittivity) **ε:** Отношение абсолютных величин электрического смещения и напряженности электрического поля в рассматриваемой точке среды. Проницаемость биологических тканей зависит от частоты.

$$\varepsilon = \frac{|\vec{D}|}{|\vec{E}|} = \varepsilon_r \varepsilon_0,$$

где $\vec{D}$ — вектор электрического смещения, Кл/м^2;

$\vec{E}$ — вектор напряженности электрического поля, В/м;

ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума = 8,854 · 10^{-12}, Ф/м;

ε_r — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость, вычисляемая по формуле

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_r' + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0},$$

где ω — угловая частота ($\omega = 2\pi f$), рад/с;

σ — проводимость среды, См/м.

Примечание — В изотропной среде диэлектрическая проницаемость выражается скалярными величинами; в анизотропной среде проницаемость выражается тензорными величинами.

3.7 **создаваемая выходная мощность** (conducted output power): Средняя мощность сигнала, посылаемого передатчиком в фидер антенны в течение периода времени, достаточно продолжительного по сравнению с периодом самой низкой частоты модуляции при нормальных условиях работы.

3.8 **проводимость** (conductivity) **σ**, См/м: Отношение абсолютных величин плотности тока в среде и напряженности электрического поля:

$$\sigma = \frac{|\vec{J}|}{|\vec{E}|},$$

где $\vec{J}$ — вектор плотности тока, А/м^2;

$\vec{E}$ — вектор напряженности электрического поля, В/м.

Примечание — В изотропной среде проводимость выражается скалярными величинами; в анизотропной среде проводимость выражается тензорными величинами и предполагается использование векторного произведения σ и $\vec{E}$.

3.9 **пределы измерения** (detection limits): Нижний и верхний пределы измерения, определяемые минимальным и максимальным измеряемыми значениями отклика измерительного оборудования.

3.10 **коэффициент заполнения** (duty factor): Отношение длительности импульса к периоду следования импульсов в периодической импульсной последовательности.

3.11 **электрическая проводимость** (electric conductivity): См. 3.8.

3.12 **напряженность электрического поля** (electric field) $\vec{E}$, В/м: Векторная величина, являющаяся характеристикой электрического поля, действующего на любую находящуюся в состоянии покоя заряженную частицу с силой $\vec{F}$, равной произведению значения $\vec{E}$ и электрического заряда частицы q:

$$\vec{F} = q\vec{E},$$

где $\vec{F}$, — вектор силы, действующей на частицу, Н;

q — заряд частицы, Кл.

3.13 **электрическое смещение** [electric flux density (displacement)] $\vec{D}$, Кл/м^2: Векторная величина, получаемая в данной точке путем прибавления значения вектора электрической поляризации $\vec{P}$ к произведению значений вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и диэлектрической проницаемости вакуума ε_0:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P},$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума равна $8{,}854 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

$\vec{E}$ — вектор напряженности электрического поля, В/м;

$\vec{P}$ — вектор электрической поляризации среды, Кл/м^2.

Примечание — В контексте требований настоящего стандарта электрическое смещение во всех точках $\vec{D}$ равно произведению значений напряженности электрического поля $\vec{E}$ и диэлектрической постоянной ε_r':

$$\vec{D} = \varepsilon_r' \vec{E}.$$

3.14 **ручное абонентское устройство** (handset): Ручное устройство, рассчитанное на прикладывание к боковой поверхности головы, состоящее из акустического выхода или наушника и микрофона и содержащее радиопередатчик и радиоприемник.

3.15 **полусферическая изотропия** (hemispherical isotropy): Максимальное отклонение коэффициента удельного поглощения энергии (*SAR*) при вращении измерительного зонда вокруг своей главной оси в момент воздействия на зонд опорной волны, падающей от полупространства перед зондом и направленной к оси зонда под разными углами.

3.16 **изотропия** (isotropy): См. 3.3, 3.15 и 3.32.

3.17 **ошибка линейности** (linearity error): Максимальное отклонение измеряемой величины в пределах выбранного диапазона измерений от опорной линии, установленной для данного интервала.

3.18 **тангенс угла потерь** (loss tangent) **tg δ:** Отношение мнимой и вещественной частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости материала:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r' \varepsilon_0},$$

где ε_r'' — мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости;

ε_r' — вещественная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости;

ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума равна $8{,}854 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

ω — угловая частота ($\omega = 2\pi f$), рад/с;

σ — проводимость среды, См/м.

3.19 **напряженность магнитного поля** (magnetic field) $\vec{H}$, А/м: Векторная величина, получаемая в данной точке путем вычитания значения вектора намагниченности $\vec{M}$ из значения вектора магнитной индукции $\vec{B}$, деленного на магнитную проницаемость μ:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} - \vec{M},$$

где $\vec{B}$ — вектор магнитной индукции, Тл;
μ — магнитная проницаемость свободного пространства, Гн/м;
$\vec{M}$ — намагниченность, А/м.

Примечание — В контексте требований настоящего стандарта $\vec{M} = 0$ во всех точках.

3.20 **магнитная индукция** (magnetic flux density) $\vec{B}$, Тл: Векторная величина, являющаяся характеристикой магнитного поля, действующего на любую заряженную частицу, движущуюся со скоростью $\vec{v}$, с силой $\vec{F}$, равной произведению векторного произведения $\vec{v} \times \vec{B}$ и электрического заряда частицы q:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},$$

где $\vec{F}$ — вектор силы, действующей на частицу, Н;
q — заряд частицы, Кл;
$\vec{v}$ — скорость частицы, м/с.

3.21 **магнитная проницаемость** (magnetic permeability) **μ:** Скалярная или тензорная величина μ, результат умножения которой на значение напряженности магнитного поля $\vec{H}$ для данной среды равен значению магнитной индукции $\vec{B}$:

$$\vec{B} = \mu\vec{H},$$

где $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля, А/м;
μ — магнитная проницаемость среды, Гн/м;
$\vec{B}$ — магнитная индукция, Тл.

Примечание — В изотропной среде магнитная проницаемость выражается скалярными величинами; в анизотропной среде проницаемость выражается тензорными величинами.

3.22 **диапазон измерений** (measurement range): Рабочий диапазон измерительной системы, ограниченный нижним и верхним пределами измерений.

3.23 **мобильное (беспроводное) устройство** [mobile (wireless) device]: В контексте требований настоящего стандарта — беспроводное коммуникационное устройство, которое в процессе использования удерживается возле уха в непосредственной близости к голове.

Примечание — Конкретное, но расширенное определение терминов «мобильный» и «портативный» приведено в [21] — «мобильный»: способный функционировать в процессе перемещения (МЭС 151-16-46); «портативный»: рассчитанный на ношение одним человеком (МЭС 151-16-47). Термин «портативный» часто подразумевает способность функционировать в процессе перемещения. В различных нормативных документах, регулирующих применение беспроводных систем, а также в отраслевых спецификациях эти определения применяются как взаимозаменяемые; при этом в одних случаях они указывают на тип беспроводных устройств, а в других — на их назначение.

3.24 **многодиапазонное (беспроводное устройство)** [multi-band (wireless device)]: Беспроводное устройство, способное функционировать в нескольких диапазонах частот.

3.25 **многорежимное (беспроводное устройство)** [multi-mode (wireless device)]: Беспроводное устройство, способное функционировать более чем в одном режиме передачи сигналов, например, в аналоговом режиме, TDMA и CDMA.

3.26 **предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии** (peak spatial-average *SAR*): Максимальное усредненное значение коэффициента удельного поглощения для конкретной массы.

3.27 **глубина проникания** (penetration depth): См. 3.37.

3.28 **проницаемость** (permittivity): См. 3.6 и 3.33.

3.29 **манекен (голова)** [phantom (head)]: В контексте требований настоящего стандарта — упрощенная модель головы человека, выполненная из материалов, электрические свойства которых подобны свойствам соответствующих [биологических] тканей.

3.30 **ушная раковина** (pinna): Выступающая часть внешнего уха, состоящая, главным образом, из хрящевой ткани, включающая в себя завиток, мочку и противозавиток.

3.31 **мощность** (power): См. 3.2, 3.7.

3.32 **изотропия зонда** (probe isotropy): Степень независимости реакции зонда, предназначенного для измерения электрического или магнитного поля, от поляризации и направления распространения падающей волны.

3.33 **относительная диэлектрическая проницаемость** (relative permittivity) ε_r: Отношение комплексной диэлектрической проницаемости к проницаемости свободного пространства. Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

изотропной, диэлектрической среды с линейным затуханием описывается выражением:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} = \varepsilon_r'\left(1 - j\frac{\varepsilon_r^*}{\varepsilon_r'}\right) = \varepsilon_r'(1 - j\,\mathrm{tg}\,\delta),$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума равна $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (диэлектрическая постоянная);

ε — комплексная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

ε_r — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_r' — вещественная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости (также называемая диэлектрической постоянной);

ε_r'' — мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости (коэффициент диэлектрических потерь), отражающая диэлектрические потери;

σ — проводимость, См/м;

ω — угловая частота, рад/с;

$\mathrm{tg}\,\delta$ — тангенс угла потерь.

3.34 **время реакции** (response time): Время, необходимое для достижения измерительным оборудованием 90 % результирующего значения после ступенчатого изменения входного сигнала.

3.35 **сканирующая система** (scanning system): Система автоматического позиционирования, способная устанавливать измерительный зонд в указанные положения.

3.36 **чувствительность (измерительной системы)** [sensitivity (of a measurement system)]: Отношение значения отклика системы (например, изменения напряжения) к значению измеряемой величины (например, напряженности электрического поля в квадрате).

3.37 **глубина проникания поля** (skin depth): Расстояние от границы среды до точки, в которой значение напряженности поля или плотности индуцированного тока уменьшается до $1/e$ значения на границе (e — основание натурального логарифма, $e = 2{,}71826$).

Глубина проникания поля δ для конкретной среды зависит от коэффициента распространения электромагнитной волны γ вдоль направления распространения [56]. Коэффициент распространения зависит от диэлектрических свойств материала и характеристик распространяющейся нормальной волны (моды).

Глубину проникания поля можно описать соотношением

$$\delta = \frac{1}{Re[\gamma]},$$

где коэффициент $\gamma = \alpha + j\beta$, α — коэффициент затухания, β — коэффициент фазы распространяющейся волны, и

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu\varepsilon + k_c^2,$$

где μ и ε — магнитная проницаемость и комплексная относительная диэлектрическая проницаемость среды соответственно, а k_c^2 — коэффициент поперечного распространения моды. Таким образом:

$$\delta = \frac{1}{Re\left\{\sqrt{-\omega^2 \mu\varepsilon + k_c^2}\right\}}.$$

В случае распространения в свободном пространстве $k_c^2 = 0$ и глубину проникновения поля рассчитывают по формуле

$$\delta = \frac{1}{\omega}\left[\left(\frac{\mu_0 \varepsilon_r' \varepsilon_0}{2}\right)\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_r' \varepsilon_0}\right)^2} - 1\right)\right]^{-\frac{1}{2}},$$

где δ — глубина проникания поля, м;
ω — угловая частота, рад/с;
ε_r' — вещественная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости;
δ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;
μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;
σ — проводимость среды, См/м.

Примечание — В режиме распространения TE_{10} в волноводе прямоугольного сечения с наибольшим значением поперечного сечения a

$$k_c^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2.$$

3.38 **коэффициент удельного поглощения энергии *SAR*** (specific absorption rate *SAR*), Вт/кг: Производная по времени электромагнитной энергии dW, поглощаемой (рассеиваемой) элементом массы dm, содержащимся в одном элементе объема dV при данной плотности ткани ρ:

$$SAR = \frac{d}{dt}\left(\frac{dW}{dm}\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{dW}{\rho dV}\right).$$

Коэффициент удельного поглощения энергии *SAR* можно рассчитать с помощью любой из приведенных ниже формул:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho};$$

$$SAR = c_h \left.\frac{dT}{dt}\right|_{t=0},$$

где E — среднеквадратичное значение напряженности электрического поля в ткани, В/м;
σ — проводимость ткани, См/м;
ρ — плотность ткани, кг/м^3;
c_h — удельная теплоемкость ткани, Дж/(кг · К);
$\left.\frac{dT}{dt}\right|_{t=0}$ — первоначальная производная по времени температуры ткани в начальный момент времени, К/с.

3.39 **суммарная стандартная неопределенность** [uncertainty (combined)]: Стандартная неопределенность результата измерений, полученного через значения других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерений изменяется при изменении этих величин.

3.40 **расширенная неопределенность** [uncertainty (expanded)]: Величина, определяющая интервал вокруг результата измерений, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеряемой величине.

3.41 **стандартная неопределенность** [uncertainty (standard)]: Неопределенность результата измерений, выраженная в виде среднего квадратического отклонения.

3.42 **длина волны** (wavelength): Расстояние между двумя точками одинаковых фаз двух последовательных волновых циклов, измеряемое в направлении распространения волны. Длина волны λ зависит от фазовой скорости v_p и частоты f и рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{v_p}{f}.$$

Длина λ электромагнитной волны зависит от частоты и скорости распространения света в данной среде в соответствии с формулой

$$c = f\lambda,$$

где f — частота, Гц;
c — скорость света, м/с;
v_p — фазовая скорость, м/с;
λ — длина волны, м.

Примечание — В вакууме скорость распространения электромагнитной волны равна скорости света.

4 Обозначения и сокращения

4.1 Физические величины

В настоящем стандарте используются следующие единицы международной системы СИ:

Символ	Величина	Наименование единицы величины	Обозначение единицы величины
α	Коэффициент ослабления	обратный метр	1/м
B	Магнитная индукция	тесла	Тл, Вб/м^2
D	Электрическое смещение	кулон на квадратный метр	Кл/м^2
c_h	Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг · К)
E	Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м
f	Частота	герц	Гц
H	Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м
J	Плотность тока	ампер на квадратный метр	А/м^2
$\bar{P}_{avg}$	Средняя по времени поглощаемая мощность	ватт	Вт
SAR	Коэффициент удельного поглощения	ватт на килограмм	Вт/кг
T	Температура	кельвин	К
ε	Диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	Ф/м
λ	Длина волны	метр	м
μ	Магнитная проницаемость	генри на метр	Гн/м
ρ	Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м^3
σ	Электрическая проводимость	сименс на метр	См/м

Примечание — В настоящем стандарте значения температуры представлены в градусах Цельсия, при этом T (°С) = T (К) — 273,16.

4.2 Константы

Символ	Физическая константа	Значение
c	Скорость света в вакууме	2,998 ·10^8 м/с
η	Волновое сопротивление	(120 π или 377) Ом
ε_0	Диэлектрическая проницаемость свободного пространства	8,854 ·10^{-12} Ф/м
μ_0	Магнитная проницаемость свободного пространства	4 π · 10^{-7} Гн/м

4.3 Сокращения

CAD (Computer Aided Design) — автоматизированное проектирование (наиболее распространенные файловые форматы — *IGES* и *DXF*);

IGES (International Graphics Exchange Standard) — международный стандарт обмена графическими файлами;

DXF (Digital Exchange File) — формат обмена цифровыми данными;

ERP (Ear Reference Point) — опорная точка уха;
RF (Radio Frequency) — высокая частота, ВЧ;
RSS (Root Sum Square) — корень квадратный из суммы квадратов;
SAM (Specific Anthropomorphic Mannequin) — специальный антропоморфический манекен.

5 Характеристики измерительной системы

5.1 Общие требования

Система измерения коэффициента удельного поглощения энергии состоит из манекена, электронной измерительной аппаратуры, системы сканирования и держателя.

Испытание проводят с помощью автоматически позиционируемого миниатюрного зонда, предназначенного для измерения напряженности электрического поля внутри манекена, имитирующего человеческую голову, находящуюся под воздействием электромагнитных полей, которые создаются беспроводными устройствами. На основе измеренных значений напряженности электрического поля определяют распределение значений коэффициента удельного поглощения энергии и рассчитывают предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии.

Испытание проводят в испытательной лаборатории, удовлетворяющей следующим требованиям:

- температура окружающего воздуха от 18°С до 25°С; отклонение температуры жидкости во время испытания не более ± 2°С;
- акустический шум окружающей среды в пределах 0,012 Вт/кг (3 % нижнего порогового значения обнаружения, составляющего 0,4 Вт/кг);
- беспроводное устройство не подключено к локальным беспроводным сетям;
- эффекты отражения, наводки от посторонних радиопередающих устройств и т.д. составляют менее 3 % измеряемого значения коэффициента удельного поглощения.

Валидацию системы измерения согласно порядку, установленному в приложении D, проводят не реже одного раза в год, при вводе новой системы в эксплуатацию, а также во всех случаях модификации системы, таких как переход на новую версию программного обеспечения, другие типы считывающей электронной аппаратуры и зондов. Изготовитель измерительного оборудования должен декларировать соответствие своей продукции требованиям настоящего стандарта.

5.2 Характеристики манекена (оболочка и жидкость)

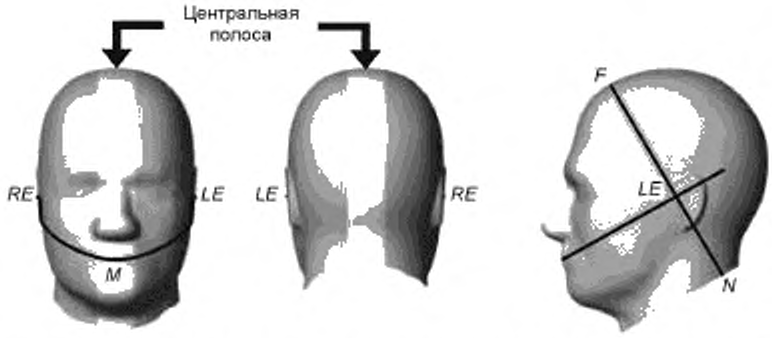
5.2.1 Общие требования

Сканирование электрического поля с помощью зонда выполняют внутри двух раздельных половин манекена-головы, имеющего отверстие в верхней части. Своими физическими характеристиками (размер и форма) манекен, предназначенный для испытания ручных абонентских устройств, имитирует голову пользователя, так как форма головы — один из главных параметров, учитываемых при оценке воздействия. Манекен должен быть изготовлен из материалов, диэлектрические свойства которых подобны диэлектрическим свойствам тканей головы. Для сканирования поля внутри манекена-головы он должен представлять собой оболочку, заполненную жидкостью. Материал оболочки должен быть максимально нейтрален к излучению, генерируемому устройством, как установлено ниже. Изготовитель должен нанести на манекен не менее трех реперных точек, предназначенных для согласования параметров системы сканирования и манекена. Эти точки должны быть хорошо различимы, а расстояние между ними при испытаниях должно быть не менее 10 см. Манекен не должен иметь руку, удерживающую устройство (см. приложение А).

5.2.2 Форма и размер стандартного манекена

Форму стандартного манекена устанавливают, исходя из размера и габаритных параметров головы крупного взрослого мужчины, относящегося к 90-му процентилю, согласно антропометрическому исследованию [18]; при этом ушам манекена должна быть придана плоская форма, соответствующая форме уха пользователя ручного абонентского устройства (см. приложение А). Выполнение этих требований показано на рисунке 1.

Для измерения коэффициента удельного поглощения энергии в соответствии с настоящим стандартом необходимо использовать стандартный манекен (*SAM*), приведенный на рисунке 2. Файлы с данными о внутренней (*SAM_in*) и внешней (*SAM_out*) поверхностях стандартного манекена, предназначенные для систем автоматизированного проектирования, свободно распространяются на компакт-дисках в форматах 3*D-CAD* (3*D-IGES* и *DXF*). Изготовитель манекена обязан документально подтвердить соответствие своей продукции требованиям к форме и толщине, предусмотренным настоящим стандартом.



RE — правая опорная точка уха (*ERP*); *LE* — левая опорная точка уха (*ERP*), *M* — опорная точка рта; *F* — передняя оконечная точка линии *N* — *F* (только для информации — отметка на манекене не требуется), *N* — шейная конечная точка линии *N* — *F* (только для информации — отметка на манекене не требуется)

Примечание — Манекен представлен в виде цельной головы исключительно для иллюстрации. Процедуры, предусмотренные настоящим стандартом, рассчитаны, главным образом, на манекен конфигурацией, показанной на рисунке 2. Область центральной полосы манекена, включая нос, имеет больший допуск на толщину.

Рисунок 1 — Изображение манекена с опорными точками уха *RE* и *LE*, опорной точкой рта *M*, опорной линией *N* — *F* и центральной полосой

5.2.3 Оболочка манекена

Материал оболочки манекена должен быть устойчив ко всем ингредиентам тканеэквивалентных жидкостей. Оболочка манекена, включая ушные вставки, должна быть изготовлена из материала, характеризующегося низкой диэлектрической проницаемостью и низким коэффициентом ослабления, с относительной диэлектрической проницаемостью ≤ 5 и тангенсом угла потерь ≤ 0,05. Отклонение формы манекена от параметров стандартного манекена (*SAM*), содержащихся в файле *CAD*, должно быть менее ± 0,2 мм. Во всех зонах, на которые проецируется ручное абонентское устройство, кроме ушей и стенок растянутого периметра (см. рисунок 2), толщина оболочки должна составлять (2 ± 0,2) мм. Ушные вставки, изготовленные из материала с низким коэффициентом ослабления (тот же, что и материал, из которого изготовлена оболочка головы), должны обеспечивать в опорных точках уха 6-миллиметровое удаление от границы тканеэквивалентной жидкости с допустимым отклонением менее ± 0,2 мм. В области центральной полосы, в пределах ± 1,0 см от центральной сагиттальной плоскости (см. рисунок 1) допустимое отклонение должно быть ± 1,0 мм.

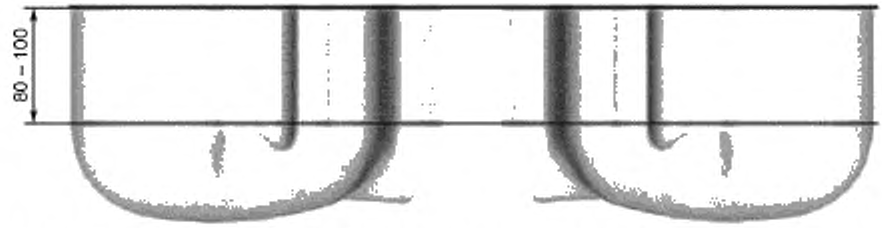


Рисунок 2 — Манекен, разрезанный по линии сагиттальной плоскости, с растянутым периметром (показан лежащим на боковой поверхности, как при испытаниях ручных абонентских устройств на соответствие требованиям к коэффициенту удельного поглощения энергии)

Точка *M* — опорная точка рта, точка *LE* — левая опорная точка уха (*ERP*), точка *RE* — правая опорная точка уха (*ERP*) показаны на рисунке 1. Эти точки должны быть нанесены на внешнюю поверхность манекена, чтобы обеспечить повторяемость правильного размещения ручного абонентского устройства (далее — испытуемое устройство) относительно манекена. Плоскость, проходящая через две опорные точки уха и точку *M*, называется «опорной плоскостью»; вдоль нее проходит линия *B* — *M* (затылок — рот). Соответствующее опорной плоскости поперечное сечение, содержащееся в файле *CAD*, показано на рисунке 3. Размер приведенного изображения в 1,3 раза меньше реального размера, который равен 26 × 18 см. Чтобы облегчить правильное размещение испытуемого устройства, линия *N* — *F* (шея—

передняя поверхность) должна быть определена как прямая линия, проходящая на уровне обеих опорных точек уха, вдоль переднего среза каждого из ушей. Проекции линий *B* — *M* и *N* — *F* должны быть обозначены на оболочке манекена, чтобы обеспечить правильное положение испытуемого устройства (см. рисунок 4). Испытуемое устройство должно прилегать центральной частью звукового выхода к опорной точке уха манекена. Места расположения всех опорных точек указаны в файлах *CAD*.

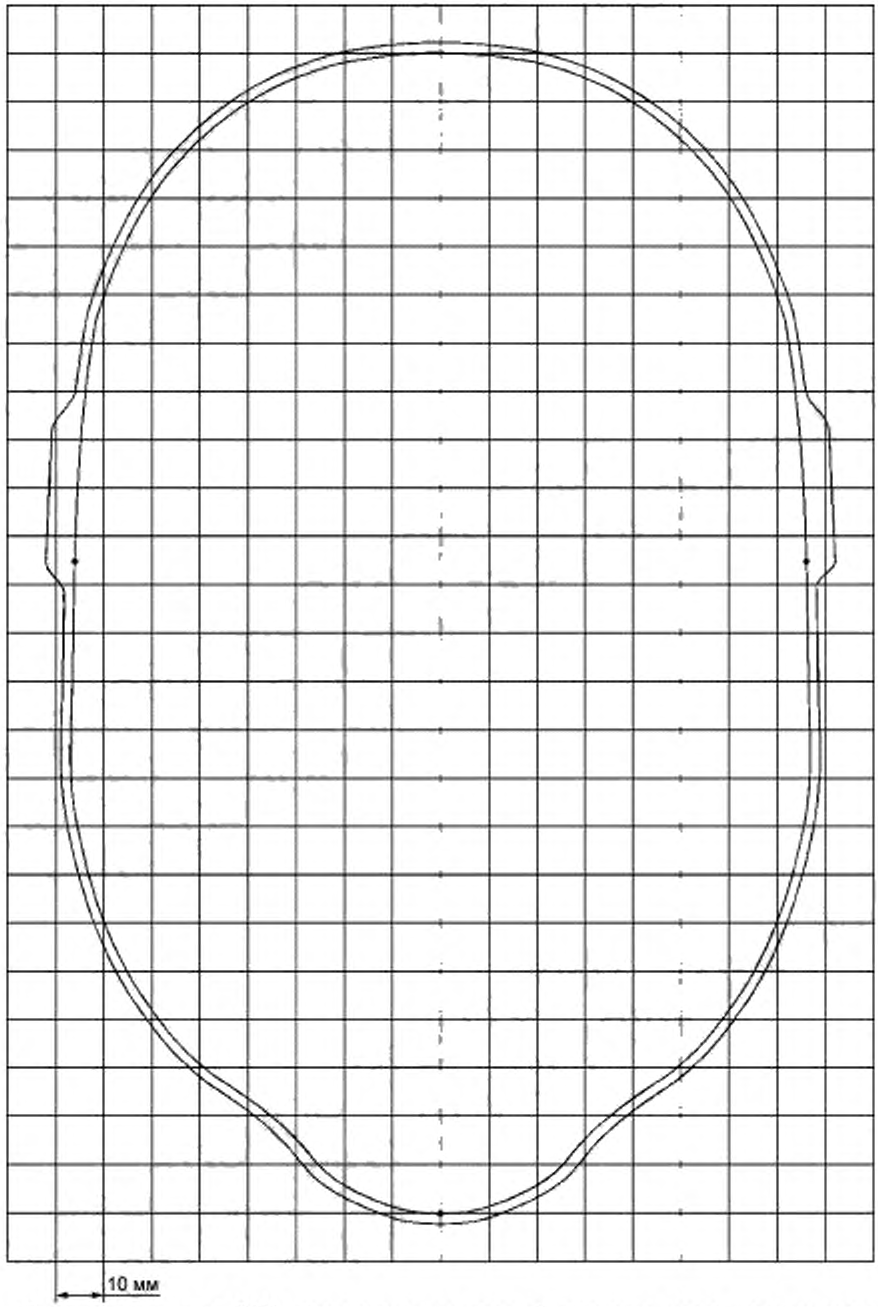
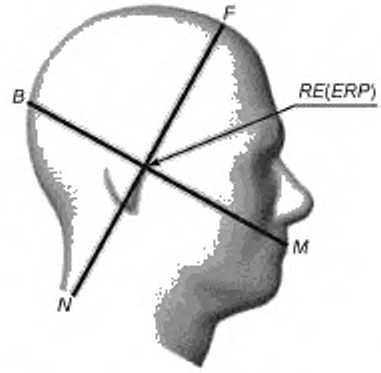


Рисунок 3 — Поперечное сечение *SAM*, соответствующее опорной плоскости, через которую проходит линия *B* — *M*



B — задняя конечная точка линии *B* — *M* (только для информации — отметка на манекене не требуется), *F* — передняя конечная точка линии *N* — *F* (только для информации — отметка на манекене не требуется); *N* — шейная конечная точка линии *N* — *F* (только для информации — отметка на манекене не требуется); *M* — опорная точка рта; *RE* — правая опорная точка уха (*ERP*)

Примечание — Манекен представлен в виде цельной головы исключительно для иллюстрации. Процедуры, предусмотренные настоящим стандартом, рассчитаны, главным образом, на манекен конфигурацией, показанной на рисунке 2.

Рисунок 4 — Вид манекена сбоку с соответствующими отметками

5.2.4 Свойства тканеэквивалентной жидкости

Жидкость, применяемая в манекене, должна иметь диэлектрические свойства, указанные в таблице 1. Для определения диэлектрических свойств тканеэквивалентных жидкостей, рассчитанных на другие частоты в пределах рабочей полосы частот, необходимо использовать метод линейной интерполяции. Примеры составов жидкостей с параметрами, указанными в таблице 1, приведены в приложении I.

Таблица 1 — Диэлектрические свойства тканеэквивалентной жидкости

Частота, МГц	Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r	Проводимость σ, См/м	Частота, МГц	Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r	Проводимость σ, См/м
300	45,3	0,87	1 900	40,0	1,40
450	43,5	0,87	1 950	40,0	1,40
835	41,5	0,90	2 000	40,0	1,40
900	41,5	0,97	2 450	39,2	1,80
1 450	40,5	1,20	3 000	38,5	2,40
1 800	40,0	1,40			

5.3 Характеристики оборудования, предназначенного для измерения коэффициента удельного поглощения энергии

Измерительное оборудование градуируют как единую систему. Зонд градуируют в комплексе с усилителем, измерительным устройством и регистрирующей системой идентичного или технически эквивалентного типа. Измерительное оборудование градуируют с каждой тканеэквивалентной жидкостью на соответствующей рабочей частоте и при соответствующей температуре методами, установленными в приложении В. Градуировка зонда отдельно от системы допускается, если установлены и соблюдены условия нагрузки на разъеме зонда.

Минимальный предел измерения должен быть менее 0,02 Вт/кг, а максимальный предел измерения — более 100 Вт/кг. Линейность должна быть в пределах ± 0,5 дБ во всем диапазоне значений коэффициента удельного поглощения энергии от 0,01 до 100 Вт/кг. Чувствительность и изотропия определяются в тканеэквивалентной жидкости. Должно быть установлено время реакции измерительного оборудования. Рекомендуется, чтобы внешний размер (диаметр) оболочки / корпуса зонда в области дипольных элементов не превышал 8 мм.

5.4 Характеристики сканирующей системы

5.4.1 Общие требования

Сканирующая система, удерживающая зонд, должна обеспечивать сканирование всего объема манекена, подвергающегося воздействию, для оценки трехмерного распределения значений коэффициента удельного поглощения энергии. Механическая конструкция сканирующей системы не должна влиять на точность измерений коэффициента удельного поглощения энергии. Положение сканирующей системы должно быть согласовано с положением манекена не менее чем по трем опорным точкам манекена, определяемым пользователем или изготовителем системы.

5.4.2 Технические требования

5.4.2.1 Точность

Точность установки наконечника зонда над областью измерений должна быть выше ± 0,2 мм.

5.4.2.2 Дискретность позиционирования

Дискретность позиционирования представляет собой шаг, с которым измерительная система способна проводить измерения. Дискретность позиционирования должна быть 1 мм или менее.

5.5 Характеристики держателя испытуемого устройства

Необходимо исключить значительное влияние на измеряемый коэффициент удельного поглощения энергии любых факторов отражения и поглощения, создаваемых элементами окружающей обстановки (такими как пол, держатель испытуемого устройства или поверхность жидкости).

Держатель испытуемого устройства должен обеспечивать крепление устройства в положении, предусмотренном пунктом 6.1.4, с допустимым отклонением от установленного угла наклона ± 1°. Держатель должен быть изготовлен из материала (материалов) с низким коэффициентом ослабления и низкой диэлектрической проницаемостью: тангенс угла потерь ≤ 0,05, относительная диэлектрическая проницаемость ≤ 5. Неопределенности позиционирования оценивают в порядке, установленном в 7.2.2.4.2.

Для исключения влияния держателя на результаты измерения коэффициента удельного поглощения энергии проводят контрольное испытание, в рамках которого держатель заменяется пенопластовыми блоками с низкой относительной диэлектрической проницаемостью и низким коэффициентом ослабления, либо испытуемое устройство крепится к манекену с помощью ленты или шнура (см. 7.2.2.4.1).

5.6 Измерение диэлектрических свойств жидкости

Диэлектрические свойства тканеэквивалентной жидкости измеряют при соответствующей температуре и на соответствующей частоте. Диэлектрические параметры оценивают и сравнивают со значениями, приведенными в таблице 1, с применением метода линейной интерполяции. При расчете коэффициента удельного поглощения энергии используют полученные результаты измерений диэлектрических свойств, а не значения, приведенные в таблице 1. Измерения могут проводиться с использованием оборудования и в соответствии с процедурами, описанными в приложении J.

Примечание — Допустимые отклонения измеренных диэлектрических параметров от значений, приведенных в таблице 1, установленные в соответствии с требованиями настоящего стандарта, указаны в 6.1.1.

6 Протокол испытаний при оценке коэффициента удельного поглощения энергии

6.1 Подготовка к измерениям

6.1.1 Общая подготовка

Диэлектрические свойства тканеэквивалентных жидкостей измеряют не более чем за 24 ч до измерения коэффициента удельного поглощения энергии, кроме случаев, когда испытательная лаборатория способна доказать, что соответствие их свойств установленным требованиям сохраняется в течение более продолжительного времени, например, с помощью еженедельных измерений. Диэлектрические свойства тканеэквивалентных жидкостей измеряют при той же температуре жидкости, что и во время измерений коэффициента удельного поглощения энергии, с допустимым отклонением ± 2 °С.

При отсутствии эквивалентной тканям головы жидкости на основе проверенных составов, рассчитанных на полосу частот от 2 до 3 ГГц и обеспечивающих отклонение обоих измеренных диэлектрических параметров от значений, приведенных в таблице 1, в пределах ± 5 %, рекомендуется следующее:

a) для частот более 300 МГц, но менее 2 ГГц измеренная проводимость и диэлектрическая проницаемость не должны отклоняться от значений, указанных в таблице 1, более чем на 5 % (неопределенность измерений параметров жидкостей рассматривается отдельно — см. 7.2.3);

b) для полосы частот от 2 до 3 ГГц измеренная проводимость не должна отклоняться от значений, указанных в таблице 1, более чем на 5 %. Неопределенность измерений относительной диэлектрической

проницаемости должна составлять не более ± 10 %, при этом, используя доступные составы, необходимо добиваться того, чтобы ее значение было максимально близко к значениям, указанным в таблице 1. Влияние отклонений диэлектрической проницаемости от установленных значений должно учитываться при оценке неопределенности измерений коэффициента удельного поглощения энергии.

Оболочку манекена наполняют тканеэквивалентной жидкостью так, чтобы для манекена, находящегося в горизонтальном положении, ее уровень в области опорной точки уха был не менее 15 см. До проведения измерений жидкость тщательно размешивают, но при этом в ней не должно быть воздушных пузырьков. Необходимо исключить эффект отражения от поверхности жидкости — для полосы частот от 300 МГц до 3 ГГц это достигается при уровне жидкости 15 см. Вязкость жидкости не должна препятствовать движению зонда.

6.1.2 *Проверка системы*

Проверка системы проводится до измерения коэффициента удельного поглощения энергии для конкретного испытуемого устройства в порядке, предусмотренном в приложении D. *Цель проверки системы* — подтвердить, что система функционирует в соответствии с установленными требованиями. *Проверка системы* представляет собой оценку повторяемости результатов испытаний с целью получения гарантий правильного функционирования системы при проведении испытаний на соответствие. *Проверку системы* проводят для выявления возможных случаев кратковременного дрейфа показаний и влияния других факторов, влияющих на неопределенность измерений, таких как:

- изменение параметров жидкости, например, вследствие испарения воды или перепадов температуры;
- отказы элементов системы;
- изменения характеристик элементов системы;
- неправильная настройка оператором параметров программного обеспечения;
- неблагоприятные условия функционирования системы, например воздействие ВЧ помех.

Проверка системы заключается в проведении полного измерения среднего коэффициента удельного поглощения энергии для 1 или 10 г ткани. Измеренное среднее значение коэффициента удельного поглощения энергии, приведенное к 1 или 10 г ткани, нормируют с учетом контрольной входной мощности стандартного источника и сравнивают с ранее зарегистрированным контрольным значением для 1или 10 г ткани, соответствующим частоте измерения, а также параметрам стандартного источника и плоского манекена. При каждой *проверке системы* определяют допустимое отклонение, которое не должно превышать 10 % контрольных значений, зарегистрированных при предыдущей *проверке системы*. Частота, на которой проводят *проверку системы*, не должна отклоняться от средней частоты в пределах рабочей полосы частот испытуемого устройства более чем на 10 %.

Примечание — Термины *«валидация системы»* и *«проверка системы»* выделены курсивом, так как они относятся к конкретным правилам испытаний, установленным для целей соответствия требованиям настоящего стандарта.

6.1.3 Подготовка испытуемого устройства

Испытуемое устройство должно использовать собственный встроенный передатчик, а также антенну (антенны), батарею и аксессуары, указанные изготовителем. Перед каждым измерением батарея должна быть полностью заряжена. Использование внешних соединений или кабелей не допускается.

Выходную мощность и частоту (канал) испытуемого устройства регулируют с помощью встроенной испытательной программы или соответствующего испытательного оборудования (имитатора базовой станции с антенной). Испытуемое устройство настраивают на передачу на максимальной мощности в условиях прилегания к уху пользователя. При проверке воздействия учитывают функциональные характеристики и параметры воздействия испытуемых устройств, такие как рабочие режимы, конфигурации антенны и т.д.

По возможности испытывают конечные коммерческие версии ручных абонентских устройств в своих обычных рабочих конфигурациях, то есть без подключенных кабелей. Кабели, подключенные к испытуемому устройству, с большой вероятностью меняют распределение токов высокой частоты передатчика на его металлических и других проводящих частях. Кроме того, если испытания проводят на прототипах ручных абонентских устройств, необходимо, чтобы их коммерческие версии имели точно те же механические и электрические характеристики, что и испытуемые прототипы. Если это не может быть гарантировано, проводят повторные испытания, для которых выбираются образцы немодифицированных коммерческих версий устройства.

Примечание — Если работа испытуемого устройства на максимальной усредненной по времени мощности невозможна, допускается проведение испытания на меньшей мощности, после чего полученные результаты масштабируют на максимальную выходную мощность при условии, что характеристика коэффициента удельного поглощения энергии для испытуемого устройства является линейной.

6.1.4 Положение испытуемого устройства по отношению к манекену

6.1.4.1 Общие положения

Настоящий стандарт предусматривает испытание ручных абонентских устройств в двух положениях относительно манекена-головы: «вдоль щеки» и «наклонное». Эти два положения определены в последующих подпунктах. Ручное абонентское устройство испытывают в обоих положениях, с левой и правой сторон манекена. Если конструкция испытуемого устройства не позволяет установить его в положения, описанные в подпунктах 6.1.4.2 и 6.1.4.3 и соответствующие обычным условиям использования, что может иметь место, например, при испытаниях некоторых асимметричных ручных абонентских устройств, применяют альтернативные положения, подробное описание которых включается в протокол испытаний. Альтернативные положения должны максимально соответствовать условиям эксплуатации, на которые рассчитано ручное абонентское устройство, и соответствовать требованиям настоящего подпункта.

6.1.4.2 Определение положения «вдоль щеки»

Испытуемое устройство устанавливают в положение «вдоль щеки» в порядке, описанном в перечислениях a) — i):

a) При необходимости приводят испытуемое устройство в состояние готовности к разговору. Например, если испытуемое устройство имеет сдвижную или откидную крышку, ее открывают. Если испытуемое устройство рассчитано также на использование с закрытой крышкой, оно подлежит испытанию в обеих конфигурациях.

b) Для испытуемого устройства, находящегося в вертикальном положении, определяют две воображаемые линии: центральную вертикальную и горизонтальную линии, как показано на рисунках 5a) и 5b). Центральная вертикальная линия должна проходить через две точки на фронтальной стороне испытуемого устройства: среднюю точку по ширине устройства w_t, которая находится на уровне акустического выхода [см. рисунки 5a) и 5b)], и среднюю точку по ширине устройства w_b, которая находится в нижней части устройства (точка B). Горизонтальная линия должна проходить через центр акустического выхода перпендикулярно к центральной вертикальной линии [см. рисунки 5a) и 5b)]. Эти две линии пересекаются в точке *A*. Следует отметить, что во многих ручных абонентских устройствах точка *A* совпадает с центром акустического выхода. В то же время акустический выход может быть расположен в любой другой точке горизонтальной линии. Также следует отметить, что центральная вертикальная линия не всегда параллельна фронтальной поверхности испытуемого устройства [см. рисунок 5b)], что особенно наглядно проявляется в устройствах с корпусом-ракушкой, с откидной крышкой и других устройствах с нестандартной формой корпуса.

c) Устанавливают испытуемое устройство вблизи поверхности манекена так, чтобы точка *A* находилась на (воображаемом) продолжении линии, проходящей через расположенные на манекене точки *RE* и *LE* (см. рисунок 6). Плоскость, определяемая центральной вертикальной линией и горизонтальной линией испытуемого устройства, должна быть параллельна сагиттальной плоскости манекена.

d) Подносят испытуемое устройство вплотную к манекену по линии, проходящей через точки *RE* и *LE* так, чтобы он коснулся уха.

e) Поворачивают испытуемое устройство вокруг (воображаемой) линии *LE – RE* до тех пор, пока его центральная вертикальная линия не совпадет с базовой плоскостью.

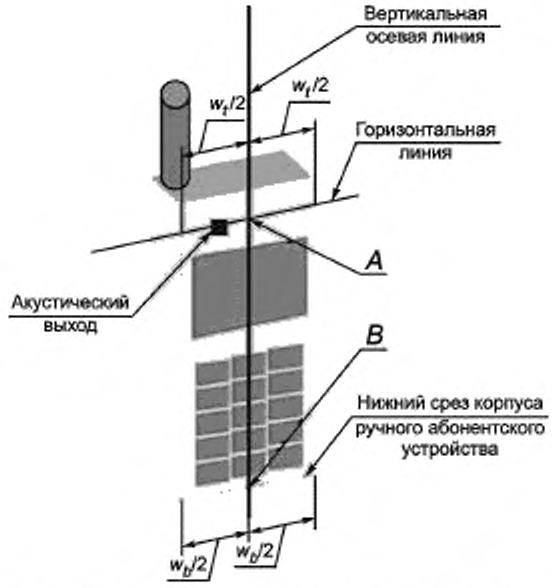
f) Поворачивают испытуемое устройство вокруг его центральной вертикальной линии до тех пор, пока плоскость, определяемая центральной вертикальной и горизонтальной линиями, не станет параллельной линии *N — F*, а затем подносят испытуемое устройство к манекену по линии *LE — RE* так, чтобы точка *A* устройства коснулась манекена в контрольной точке уха (*ERP*).

g) Удерживают точку *A* на линии, проходящей через точки *RE* и *LE*, и поддерживая контакт между испытуемым устройством и ушной раковиной, поворачивают испытуемое устройство вокруг линии *N — F* до тех пор, пока он не коснется любой своей точкой любой точки манекена, расположенной ниже ушной раковины (т.е. в области щеки) (см. рисунок 6). Физические углы вращения подлежат документированию.

h) Удерживая испытуемое устройство так, чтобы точка *A* постоянно находилась в контакте с опорной точкой уха (*ERP*), поворачивают его вокруг линии, перпендикулярной к плоскости, которую определяют его центральная вертикальная и горизонтальная линии, и проходящей через расположенную на нем точку *A* до тех пор, пока центральная вертикальная линия испытуемого устройства не совпадет с базовой плоскостью.

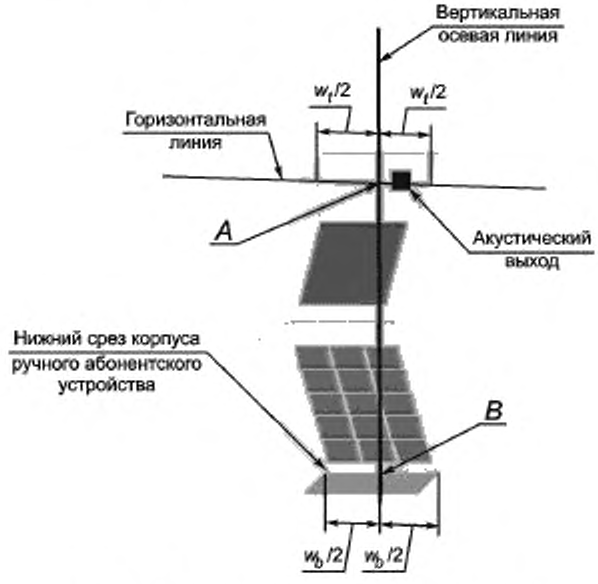
i) Убеждаются в правильности положения «вдоль щеки» по следующим критериям:

- линия *N — F* находится в плоскости, которую определяют центральная вертикальная и горизонтальная линии испытуемого устройства;
- точка *A* испытуемого устройства касается ушной раковины в опорной точке уха;
- центральная вертикальная линия испытуемого устройства находится в базовой плоскости.



a) Типовое ручное абонентское устройство с «фиксированным» корпусом

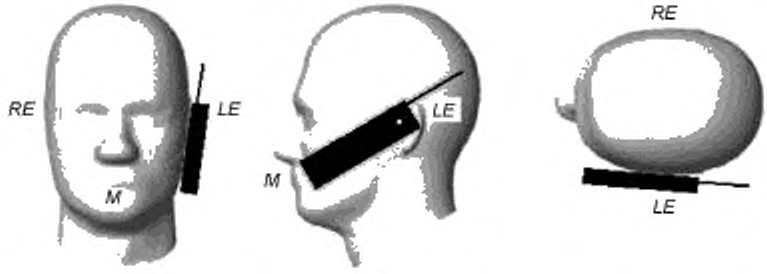
w_t — ширина ручного устройства на уровне акустического выхода; w_b — ширина ручного устройства в нижней части корпуса; A — средняя точка по ширине ручного устройства w_t, расположенная на уровне акустического выхода; B — средняя точка по ширине ручного устройства w_b, расположенная на уровне нижнего среза корпуса



b) Типовое ручное устройство с раскладывающимся корпусом («ракушка»)

w_t — ширина ручного устройства на уровне акустического выхода; w_b — ширина ручного устройства в нижней части корпуса; A — средняя точка по ширине ручного устройства w_t, расположенная на уровне акустического выхода; B — средняя точка по ширине ручного устройства w_b, расположенная на уровне нижнего среза корпуса

Рисунок 5 — Вертикальные и горизонтальные опорные линии и опорные точки A и B для двух типов испытуемых устройств



M — опорная точка рта; *LE* — левая опорная точка уха (*ERP*); *RE* — правая опорная точка ухе (*ERP*)

Примечание — Данное положение испытуемого устройства поддерживается при проведении испытаний на манекене, который находится в положении, показанном на рисунке 2.

Рисунок 6 — Ручное абонентское устройство в положении «вдоль щеки» с левой стороны *SAM*

6.1.4.3 Определение «наклонного» положения

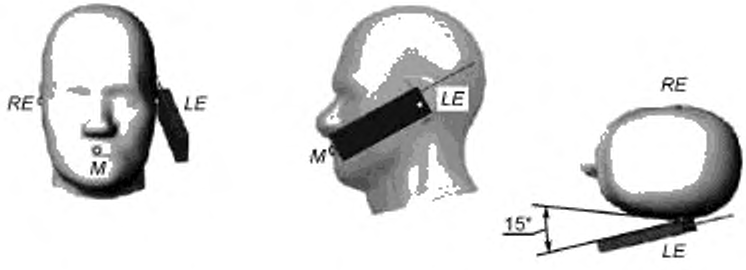
Испытуемое устройство устанавливают в «наклонное» положение в порядке, описанном в перечислениях a) — d):

a) Испытуемое устройство устанавливают в положение «вдоль щеки» после повторения шагов в соответствии с перечислениями a) — i), описанных в 6.1.4.2 (см. рисунок 6).

b) Испытуемое устройство при сохранении его ориентации отводят от манекена параллельно базовой плоскости на расстояние, достаточное для того, чтобы повернуть его на 15°.

c) Осуществляют поворот испытуемого устройства вокруг горизонтальной линии на 15° (см. рисунок 7).

d) Испытуемое устройство при сохранении его ориентации подносят к манекену по линии, проходящей через точки *RE* и *LE*, так, чтобы любая часть устройства касалась уха. «Наклонное» положение считается достигнутым при контакте устройства с ушной раковиной. Если контакт происходит не в области ушной раковины — например, антенна упирается в затылок манекена — необходимо уменьшить угол наклона испытуемого устройства. В данном случае «наклонное» положение считается достигнутым при контакте любой части испытуемого устройства с ушной раковиной; при этом любая другая часть испытуемого устройства также может быть в контакте с манекеном — например, антенна может касаться затылка.



M — опорная точка рта, *LE* — левая опорная точка уха (*ERP*); *RE* — правая опорная точка ухе (*ERP*)

Примечание — Данное положение испытуемого устройства поддерживается при проведении испытаний на манекене, который находится в положении, показанном на рисунке 2.

Рисунок 7 — Ручное абонентское устройство в «наклонном» положении с левой стороны *SAM*

6.1.5 Частоты для испытаний

Испытуемое устройство должно соответствовать действующим требованиям к параметрам воздействия на всех используемых им каналах передачи. Однако проведение испытания на каждом из каналов нецелесообразно. Цель настоящего пункта — определить поднабор каналов, на которых следует измерять коэффициент удельного поглощения энергии. Этот поднабор каналов выбирают так, чтобы проведенные в нем измерения могли характеризовать соответствие испытуемого устройства всем применимым нормам воздействия.

Испытание ручного абонентского устройства в каждом из его рабочих режимов проводят на канале, ближайшем к центру каждого диапазона частот передачи. Если ширина полосы частот передачи $\Delta f = f_{high} - f_{low}$ превышает 1 % центральной частоты f_c, испытание проводят также на каналах, находящихся на самой низкой и самой высокой частотах полосы частот передачи. Более того, если ширина полосы частот передачи превышает 10 % центральной частоты, число каналов N_c, на которых должны быть проведены испытания, определяют по следующей формуле:

N_c = 2 × округленное в бóльшую сторону значение $[10 \cdot (f_{high} - f_{low})/f_c] + 1$,

где f_c — центральная частота полосы частот, Гц;

f_{high} — верхняя частота полосы частот, Гц;

f_{low} — нижняя частота полосы частот, Гц;

N_c — число каналов;

Δf — ширина полосы частот передачи, Гц.

Примечание — Функция округления в бóльшую сторону × округляет независимую переменную x до ближайшего большего целого числа. Таким образом, число каналов N_c всегда остается нечетным. Все испытуемые каналы должны иметь равное (максимально возможное) разнесение и должны включать в себя каналы, находящиеся на самой низкой и самой высокой частотах полосы частот передачи.

6.2 Проводимые испытания

Для определения предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии *SAR* ручного абонентского устройства должны быть проведены его испытания во всех положениях, конфигурациях и рабочих режимах на каждой частоте диапазона в порядке, предусмотренном описанными ниже шагами 1 — 3. Блок-схема процесса испытаний представлена на рисунке 8.

Шаг 1: Испытание, описанное в 6.3, проводят на канале, ближайшем к центральной частоте полосы частот передачи f_c:

a) для всех положений испытуемого устройства (положение «вдоль щеки» и «наклонное», с левой и с правой стороны манекена, как это предусмотрено 6.1.4);

b) для всех конфигураций в каждом из положений испытуемого устройства согласно перечислению a), например, с выдвинутой и убранной антенной;

c) для всех рабочих режимов, например аналоговом и цифровом, в каждом из положений устройства согласно перечислению a), во всех конфигурациях согласно перечислению b) и в каждой частоте диапазона.

При необходимости проводят испытания более чем на трех частотах согласно 6.1.5 ($N_c > 3$), т.е. испытаниям в соответствии со всеми описанными выше условиями подлежат все частоты, конфигурации и режимы.

Шаг 2: Для установленного при выполнении шага 1 условия, обеспечивающего высшее значение предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии, испытания, описанные в 6.3, повторяют на всех остальных испытательных частотах, т.е. на самой низкой и самой высокой частотах полосы частот передачи (см. 6.1.5). Для всех остальных условий (положение, конфигурация и рабочий режим испытуемого устройства), при которых предельный пространственно усредненный коэффициент удельного поглощения энергии, установленный при выполнении шага 1, находится в пределах 3 дБ от соответствующего допустимого значения коэффициента удельного поглощения энергии, также рекомендуется повторить испытания на всех остальных испытательных частотах.

Шаг 3: Проводят анализ всех данных и определяют наивысшее значение предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии, измеренного при выполнении шагов 1 и 2.

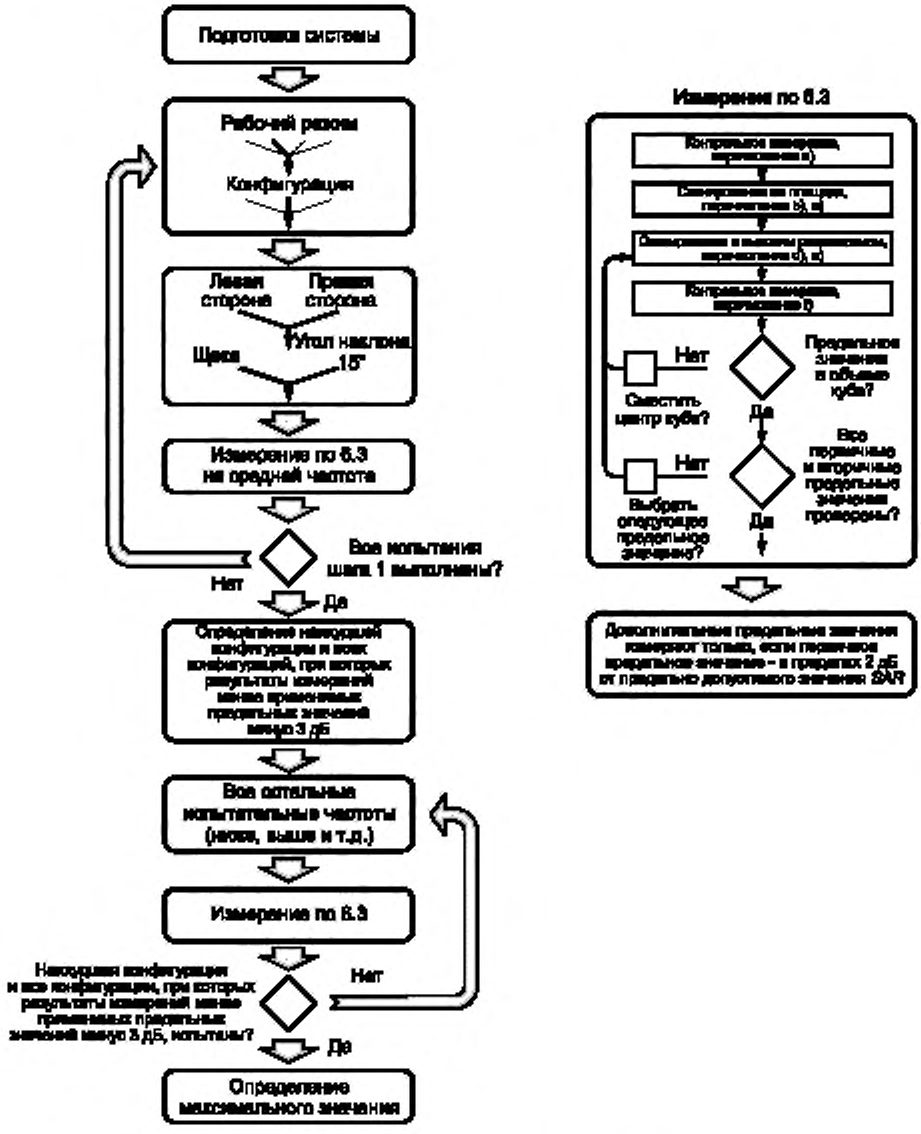


Рисунок 8 — Блок-схема процесса испытаний

6.3 Порядок проведения измерений

Применительно к каждому из условий испытания (см. рисунок 8), описанных в 6.2, выполняют следующие действия:

a) Измеряют локальный коэффициент удельного поглощения энергии в контрольной точке, удаленной от внутренней поверхности манекена на 10 мм или менее в нормальном направлении. Контрольная точка может быть расположена в непосредственной близости к уху.

b) Измеряют распределение коэффициента удельного поглощения энергии внутри манекена (процедура сканирования по площади *area scan*). Распределение коэффициента удельного поглощения энергии определяют на внутренней поверхности одной стороны манекена-головы, как минимум, на площади боль-

шей, чем проекция испытуемого устройства с антенной. Шаг пространственной сетки должен быть менее 20 мм. Точность шага может быть проверена с помощью стандартных функций, описанных в 7.2.4. При сканировании поверхности расстояние между геометрическим центром диполей зонда и внутренней поверхностью манекена должно быть не более 8,0 мм (допуск ± 1,0 мм). Рекомендуется, но не обязательно, чтобы во всех точках измерения угол между зондом и линией, направленной под прямым углом к поверхности, составлял менее 30° (см. рисунок 9).

Примечание — Если этот угол превышает 30°, а расстояние до точки измерения менее одного диаметра наконечника зонда, граничный эффект возрастает и становится зависимым от поляризации. Возникающая дополнительная неопределенность должна быть проанализирована и учтена.

c) После сканирования значений коэффициента удельного поглощения энергии определяют положение точки с максимальным значением, а также положение всех не относящихся к области сканирования с высоким разрешением точек с локальными максимальными значениями, отличающимися от максимального значения коэффициента удельного поглощения энергии не более чем на 2 дБ. Дополнительные пиковые значения измеряют только в случаях, когда первичное пиковое значение отличается от допустимого значения коэффициента удельного поглощения энергии не более чем на 2 дБ (т.е. 1 Вт/кг при допустимом значении 1,6 Вт/кг для 1 г или 1,26 Вт/кг при допустимом значении 2 Вт/кг для 10 г). Это положение согласуется с ранее заявленным пороговым значением 2 дБ.

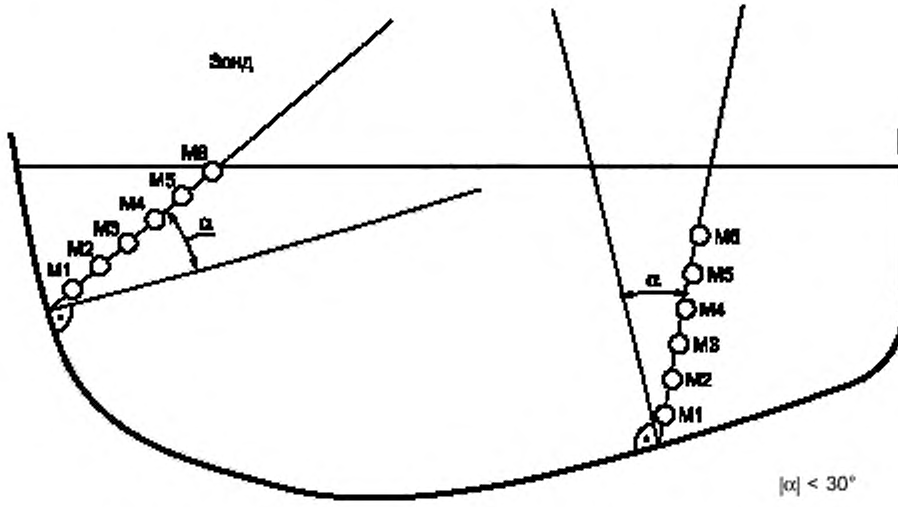
d) Измеряют коэффициент удельного поглощения энергии с шагом сетки 8 мм или менее в объеме минимальными размерами 30 × 30 × 30 мм (глубина) (процедура сканирования с высоким разрешением *zoom scan*). Шаг сетки в вертикальном направлении должен быть 5 мм или менее (см. приложение С, подраздел С.3.3). Отдельные сетки центруют по каждой из точек с локальным максимальным значением коэффициента удельного поглощения энергии, определенных при выполнении требований перечисления c). Отклонения, обусловленные возмущением поля между границей среды и диэлектрической оболочкой/корпусом зонда, также должны быть сведены к минимуму — это условие выполняется, когда расстояние между поверхностью манекена и физическим наконечником зонда будет превышать половину диаметра наконечника зонда. Другие методы предусматривают ввод поправок на граничный эффект, обеспечивая высокую точность измерений на расстояниях менее половины диаметра зонда [51]. Рекомендуется (но не обязательно), чтобы во всех точках измерения угол между зондом и линией, направленной под прямым углом к поверхности, был менее 30°.

Примечание — Если этот угол превышает 30°, а расстояние до точки измерения менее одного диаметра наконечника зонда, граничный эффект возрастает и становится зависимым от поляризации. Возникающая дополнительная неопределенность должна быть проанализирована и учтена.

e) Определяют локальные значения коэффициента удельного поглощения энергии при пространственном разрешении, необходимом для усреднения массы, посредством проведения процедур интерполяции и экстраполяции, описанных в приложении С.

f) В месте в соответствии с перечислением a) измеряют локальное значение коэффициента удельного поглощения энергии. Абсолютное значение ухода измеряемого параметра, т.е. разницу между значениями коэффициента удельного поглощения энергии, измеренными в соответствии с перечислениями f) и a), учитывают при оценке неопределенности измерений (см. таблицу 3). Рекомендуется, чтобы уход параметра находился в пределах ± 5 %. В случае, если этого невозможно добиться даже проведением повторного испытания, используют дополнительную информацию, такую как временная зависимость локальных значений коэффициента удельного поглощения энергии, позволяющая убедиться в том, что применяемая во время испытания выходная мощность соответствует требованиям к проведению испытания ручного абонентского устройства. В случаях, если сканирование с высоким разрешением необходимо проводить несколько раз, контрольное измерение мощности выполняют после каждого сканирования. При этом уход параметра всегда регистрируют с учетом разницы между начальным состоянием испытуемого устройства с полностью заряженной батареей и его состоянием при всех последующих измерениях с использованием той же батареи.

Примечание — Термины *«сканирование по площади»* и *«сканирование с высоким разрешением»* выделены курсивом, так как они относятся к конкретным правилам испытаний, установленным в соответствии с требованиями настоящего стандарта.



M1, ..., M6 — примеры точек измерения, используемых для экстраполяции по поверхности;
α - угол между зондом и линией, находящейся под прямым углом к поверхности

Рисунок 9 — Ориентация зонда по отношению к линии, находящейся под прямым углом к поверхности (на примере двух точек)

6.4 Последующая обработка результатов измерений коэффициента удельного поглощения энергии

6.4.1 Интерполяция

Если разрешение измерительной сетки недостаточно для вычисления среднего значения коэффициента удельного поглощения энергии для данной массы, выполняют интерполяцию между точками измерения. Примерные схемы интерполяции приведены в приложении С.

6.4.2 Экстраполяция

Зонды электрического поля, предназначенные для измерения коэффициента удельного поглощения энергии, обычно содержат три ортогональных диполя, которые встроены в защитную оболочку/корпус и расположены непосредственно один возле другого. Измерительная (калибровочная) точка должна отступать на несколько миллиметров от края наконечника зонда, и этот отступ учитывают при выборе места измерения коэффициента удельного поглощения энергии. Примерные схемы экстраполяции приведены в приложении С.

6.4.3 Определение усредняющего объема

Усредняющий объем имеет форму куба с размером стороны, соответствующим массе 1 или 10 г. За плотность ткани головы принимается 1000 кг/м^3 (плотность реальной жидкости, наполняющей манекен, не учитывают). Длина стороны куба массой 1 г равна 10 мм, а длина стороны куба массой 10 г — 21,5 мм.

Если куб пересекает поверхность манекена, он должен быть сориентирован так, чтобы три его вершины касались поверхности оболочки (см. приложение С, пункт С.2.2.1), или чтобы одна его грань касалась поверхности в своей центральной точке (см. приложение С, пункт С.2.2.2). Ближайшую к поверхности оболочки грань куба видоизменяют по форме поверхности, а появившийся в результате этого дополнительный объем вычитают на стороне, противоположной грани куба. Схемы усреднения по кубическому объему приведены в приложении С. Описание методов расчета коэффициента удельного поглощения энергии, усредненного по предварительно определенной массе, приведено в приложении С.

6.4.4 Поиск максимальных значений

Кубический усредняющий объем перемещают по области *сканирования с высоким разрешением* вдоль внутренней поверхности манекена, вблизи точек с локальными максимальными значениями коэффициента удельного поглощения в соответствии с принципами, изложенными в приложении С. Куб с наибольшим локальным максимальным значением коэффициента удельного поглощения энергии не должен находиться на границе/периметре области *сканирования с высоким разрешением*. В противном случае область *сканирования с высоким разрешением* смещают и проводят повторные измерения.

7 Оценка неопределенности измерений

7.1 Общие принципы

7.1.1 Концепция оценки неопределенности

Концепция оценки неопределенности измерений коэффициента удельного поглощения энергии для ручных абонентских устройств имеет в своей основе общие правила, сформулированные в документе ИСО/МЭК: 1995 «Руководство по выражению неопределенности измерений». Тем не менее оценка неопределенности измерений при проведении комплексных измерений остается сложной задачей, требующей специальных инженерных знаний. Для облегчения выполнения этой задачи в настоящий раздел включены рекомендации и формулы для вычислений, обеспечивающие оценку каждого отдельно взятого элемента неопределенности измерений. Концепция оценки неопределенности измерений коэффициента удельного поглощения предназначена для определения системной неопределенности измерений в пределах полосы частот от 300 МГц до 3 ГГц применительно к любым испытуемым устройствам. Одним из достоинств данной концепции оценки неопределенности измерений является возможность расчета неопределенности измерений третьей стороной: так таблица 3 может быть предоставлена изготовителем системы после ее монтажа. Недостаток аппроксимаций, предусмотренных настоящим разделом, заключается в том, что в некоторых случаях неопределенность измерений может завышаться. Несмотря на то, что оценка неопределенности измерений, относящейся к конкретной полосе частот, возможна, ее следует избегать. Если в соответствии с настоящим стандартом для некоторой влияющей величины допускается отклонение X % от контрольного значения, в таблице 3 в качестве максимального должно быть использовано большее из двух значений: X % и отклонения, определенного с учетом конкретного места монтажа системы. Необходимо отметить, что одних лишь данных, представленных в таблице 3, недостаточно — помимо них, требуются подробно документированные сведения об оценке каждой из влияющих величин, включая описание методов оценки, анализ данных по каждому элементу, а также информация о том, как из имеющегося набора данных было выведено значение неопределенности измерений.

7.1.2 Оценка по типам А и В

Стандартную неопределенность измерений оценивают как по типу А, так и по типу В. При проведении анализа по типу А стандартную неопределенность u_i выводят на основе рассчитанного стандартного отклонения результатов статистических наблюдений. При проведении анализа по типу В стандартную неопределенность u_i выводят на основе верхнего a_+ и нижнего a_- предельных значений рассматриваемой величины с учетом функции распределения вероятности, согласно которой $a = (a_+ - a_-)/2$, и тогда:

- прямоугольное распределение: $u_i = a/\sqrt{3}$;

- треугольное распределение: $u_i = a/\sqrt{6}$;

- нормальное распределение: $u_i = a/k$;

- U-образное (асимметричное) распределение: $u_i = a/\sqrt{2}$,

где a — половина интервала между предельными значениями при изменении влияющей величины;

u_i — стандартная неопределенность;

k — коэффициент охвата.

При числе повторных измерений n для того же конкретного испытуемого устройства или величины при тех же условиях испытаний в качестве стандартной неопределенности измерений может использоваться стандартное отклонение среднего значения ($= s/\sqrt{n}$), где s — стандартное отклонение, полученное по результатам большого числа измерений, произведенных ранее в тех же условиях испытаний. Заданные значения стандартного отклонения, выведенные по результатам большого числа повторных испытаний, могут использоваться для оценки элементов неопределенности измерений лишь в случаях, если система, методы, конфигурация, условия и т.д. являются представительными для испытаний конкретного ручного абонентского устройства [62]. Однако заданные значения не учитывают влияния характеристик любого испытуемого устройства. Для любого испытуемого устройства значение n, используемое для оценки стандартного отклонения среднего значения, представляет собой число испытаний, проведенных с данным испытуемым устройством, а не испытаний, по результатам которых выведено заданное значение.

7.1.3 Числа степеней свободы и коэффициент охвата

Когда число степеней свободы менее 30, коэффициент охвата 2 не является подходящим мультипликатором для достижения уровня доверительной вероятности 95 % [7]. С приемлемой для практики точностью может быть использован коэффициент *t*-распределения Стьюдента вместо коэффициента охвата *k*. Стандартные отклонения *t* - распределений являются более узкими, чем при нормальном (Гауссовом) распределении, но формы их кривых приближаются к форме нормального распределения при больших числах степеней свободы. Для большинства значений стандартной неопределенности измерений, выведенных путем анализа по типу В, число степеней свободы может быть принято бесконечным [62]. В этом случае эффективное число степеней свободы суммарной стандартной неопределенности u_c в наибольшей мере зависит от числа степеней свободы составляющих, оцениваемых по типу А, и их значений, относительно составляющих, оцениваемых по типу В.

Для совокупностей малых выборок коэффициент охвата k_p для данной вероятности p определяется как

$$k_p = t_p(v_{eff}) ,$$

где t_p (v_{eff}) — *t*-распределение;

v_{eff} — эффективное число степеней свободы, полученное с помощью формулы Велч-Саттертвейт:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^{m} \frac{c_i^4 u_i^4}{v_1}} .$$

Индекс *p* обозначает уровень доверительной вероятности, например 95 %. Таблицы со значениями $t_p(v_{eff})$ представлены в различных документах, например NIST TN1297 [46].

Примечание — Предположим, что суммарная стандартная неопределенность, рассчитанная на основе всех влияющих величин таблицы 3 и с учетом предполагаемой 7-процентной погрешности позиционирования, составляет v_c = 14,5 %. Предположим также, что число образцов или испытаний равно 5. Тогда v_i = 4, а число степеней свободы для всех остальных элементов $v_i = \infty$. Из уравнения

$$v_{eff} = u_c^4 \Big/ \sum_{i=1}^{m} \frac{c_i^4 u_i^4}{v_1}$$

следует, что действительное число степеней свободы для суммарной стандартной неопределенности v_{eff} = 74, следовательно, в данном случае применим коэффициент охвата k = 2, а расширенная неопределенность U = 29 %. Если увеличить стандартную неопределенность позиционирования до 9 % и уменьшить число испытаний до 4 (v_i = 3), тогда v_c = 15,6 %, v_{eff} = 27, $k = k_p = k_{95} = t = t_{95}$ = 2,11, а расширенная неопределенность U будет равна 2,11 · 15,6 = 32,9 % .

7.2 Составляющие неопределенности измерений

7.2.1 Влияние измерительной системы

7.2.1.1 Градуировка измерительного оборудования

Порядок оценки чувствительности (градуировки) приведен в приложении В вместе с описанием метода определения неопределенности. Неопределенность, обусловленную чувствительностью, устанавливают, исходя из нормального распределения.

7.2.1.2 Изотропия зонда

Изотропию зонда измеряют в соответствии с порядком, предусмотренным в приложении В. Неопределенность, обусловленную изотропией, оценивают, исходя из прямоугольного распределения вероятности.

Общая неопределенность, обусловленная изотропией, равна

$$\sqrt{(1 - w_i) \cdot [\text{осевая изотропия}]^2 + w_i \cdot [\text{полусферическая изотропия}]^2} ,$$

где w_i — весовой коэффициент, позволяющий учитывать углы воздействия поля вокруг воображаемой сферы, окружающей наконечник зонда.

Если во время проведения измерений ориентация зонда по отношению к поверхности в основном нормальная (в пределах ± 30°), то $w_i = 0,5$; в противном случае $w_i = 1$.

7.2.1.3 Линейность зонда

Линейность зонда оценивают по второй степени измеренного значения напряженности электрического поля в соответствии с порядком, представленным в приложении В. После этого для установления линейности проводят коррекцию. Неопределенность оценивают после коррекции. Поскольку диодные датчики могут функционировать в пульсирующем поле как пиковые детекторы, линейность оценивают по двум сигналам: немодулированному сигналу и импульсному сигналу с коэффициентом заполнения 10 % и частотой следования 500 Гц (более консервативное значение неопределенности измерений, чем, например, при частоте следования 11 или 217 Гц). Оценку проводят в диапазоне от 0,4 до 100 Вт/кг с шагом 3 дБ или менее. Неопределенность коэффициента удельного поглощения энергии оценивают как максимальное для всего сеанса измерений отклонение квадратов измеренного и реального значений напряженности поля. Неопределенность оценивают, исходя из прямоугольного распределения.

7.2.1.4 Пределы измерения

Пределы измерения оценивают в соответствии с порядком, представленным в приложении В. Проверка линейности по 7.2.1.3 позволяет оценить неопределенность для нижнего (0,4 Вт/кг) и верхнего (100 Вт/кг) пределов измерения при условии, что коэффициент заполнения составляет от 10 % до 100 %. Если измерения проводят за пределами этого диапазона, параметры оценки, предусмотренные 7.2.1.3, должны быть соответственно увеличены. Неопределенность оценивают, исходя из прямоугольного распределения.

7.2.1.5 Граничный эффект

Граничный эффект зонда обусловлен эффектами взаимосвязи между диполями зонда и границами среды у оболочки. Характеристики граничного эффекта могут быть оценены путем настройки волновода в соответствии с приложением В. Неопределенность, обусловленную граничным эффектом зонда, выводят на основе аппроксимации первого порядка экспоненциального затухания в сочетании с линейной функцией, представляющей граничный эффект, по формуле

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = \delta SAR_{be}\,\frac{(d_{be} + d_{step})^2}{2d_{step}} \cdot \frac{(e^{-d_{be}/(\delta/2)})}{\delta/2} \quad \text{для } (d_{be} + d_{step}) < 10 \text{ мм},$$

где $SAR_{uncertainty}$ — неопределенность измерений *SAR*, в процентах от граничного эффекта зонда;

δSAR_{be} — расхождение между значением коэффициента удельного поглощения, измеренным на расстоянии d_{be} от границы, и значением коэффициента удельного поглощения, полученным аналитическим методом, в процентах от коэффициента удельного поглощения.

d_{be} — расстояние между поверхностью и ближайшей измерительной точкой *сканирования с высоким разрешением*, мм;

d_{step} — расстояние (шаг) между первой и второй измерительными точками, ближайшими к поверхности манекена, мм, при условии, что граничный эффект во второй точке является пренебрежимо малым;

δ — минимальная глубина зондирования, мм, для тканеэквивалентных жидкостей, предусмотренных настоящим стандартом (см. приложение I), т. е. $\delta \approx 14$ мм при частоте 3 ГГц.

Значение неопределенности измерений, обусловленной граничным эффектом зонда, заносят в соответствующие строку и колонку таблицы значений неопределенности, исходя из прямоугольного распределения.

7.2.1.6 Считывающая электроника

Элементы неопределенности измерений, вносимые считывающей электроникой зонда, включая неопределенность, обусловленную усилением, линейностью и реакцией зонда, а также алгоритмом вычисления, оценивают, исходя из наихудших условий. Если для электронных считывающих компонентов предусмотрены допустимые отклонения одного порядка, каждое значение допустимого отклонения преобразуют в стандартную неопределенность с использованием нормального распределения. Корень квадратный из суммы квадратов этих неопределенностей в дальнейшем используют для расчета суммарной стандартной неопределенности, вносимой считывающей электроникой.

7.2.1.7 Время реакции

Зонд подвергают воздействию электрического поля с напряженностью, при которой значение *SAR* на границе манекена и тканеэквивалентной жидкости не менее 2 Вт/кг. Время реакции оценивают как время, затрачиваемое измерительной аппаратурой (зондом и считывающей электроникой) на отображение

90-процентного ожидаемого конечного значения после ступенчатого изменения параметров или выключения-включения источника энергии. Отклонением коэффициента удельного поглощения энергии, обусловленным временем реакции, можно пренебречь, если во время измерения коэффициента удельного поглощения энергии зонд находится в пространственно неизменном положении в течение времени, более чем вдвое превышающего время реакции. В этом случае в третьей колонке таблицы 3 проставляют нулевое значение. Если зонд не находится в пространственно неизменном положении в течение времени, превышающего время реакции вдвое или более, в третьей колонке проставляют реальное значение неопределенности измерений, обусловленной временем реакции.

7.2.1.8 Время накопления

Значение времени накопления при измерении электрического поля в конкретной точке может привести к дополнительной неопределенности, обусловленной дискретизацией, если ручное испытуемое устройство не генерирует непрерывный сигнал или если считывающая система не синхронизируется с этим сигналом. Эта неопределенность зависит от характеристик сигнала и подлежит измерению до любых измерений коэффициента удельного поглощения энергии. Если передаваемый сигнал является модулированным, неопределенность, обусловленную временем накопления, учитывают при оценке общей неопределенности измерений. При оценке элементов неопределенности измерений, обусловленной временем накопления, используют прямоугольное распределение.

Примечание — Для сигнала *TDMA* максимальная неопределенность измерений при заданном времени накопления t_{int} выражается формулой

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = \sum_{all\,sub-frames} \frac{t_{frame}}{t_{int}} \cdot \frac{slot_{idle}}{slot_{total}}$$

при $t_{int} > t_{frame}$,

где $SAR_{uncertainty}$ — неопределенность измерения *SAR*, обусловленная временем накопления, %;

t_{frame} — длительность кадра;

$slot_{idle}$ — число свободных интервалов в кадре;

$slot_{total}$ — общее количество интервалов в кадре.

Полученное значение неопределенности измерений проставляют в таблице; при этом может быть использовано прямоугольное распределение.

7.2.2 Неопределенность измерений, обусловленная механическими ограничениями

7.2.2.1 Система сканирования

Механические ограничения устройства позиционирования зонда могут влиять на точность и воспроизводимость позиционирования, вызывая отклонения измеряемого коэффициента удельного поглощения. Результирующая неопределенность может оцениваться с учетом максимального отклонения d_{ss} местоположения устройства позиционирования зонда от положения, в котором реально должен находиться зонд для проведения измерений, определяемого геометрическим центром датчиков зонда. Исходя из прямоугольного распределения вероятности, предельное пространственно усредненное отклонение коэффициента удельного поглощения энергии, обусловленное механическими ограничениями устройства позиционирования зонда d_{ss}, может быть рассчитано с использованием аппроксимации ошибки первого порядка:

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = \frac{d_{ss}}{\delta/2}\,100,$$

где $SAR_{uncertainty}$ — неопределенность измерения *SAR*, обусловленная механическими ограничениями устройства позиционирования зонда, %;

d_{ss} — максимальное отклонение расчетного положения центра датчиков зонда и его реального положения, по отношению к контрольной точке, определенной изготовителем системы;

δ — минимальная глубина зондирования, мм, для тканеэквивалентных жидкостей, предусмотренных настоящим стандартом (см. приложение I), т. е. $\delta \approx 14$ мм при частоте 3 ГГц.

Если механические ограничения устройства позиционирования зонда не указаны изготовителем этого устройства, они должны быть оценены для определения неопределенности измерений *SAR*. Для этого достаточно измерить относительную точность движения в области грубого сканирования и преобразовать расхождения между положениями, указываемыми программным обеспечением, и реальными положениями, к значениям неопределенности. Отклонение коэффициента удельного поглощения энергии, рассчитанное с использованием прямоугольного распределения вероятности, проставляют в третьей колонке таблицы 3.

7.2.2.2 Оболочка манекена

Неопределенность измерений, обусловленную манекеном, определяют отклонением пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии из-за допусков при изготовлении манекена и отклонений диэлектрических параметров тканеэквивалентной жидкости внутри манекена (см. 7.2.3.3, 7.2.3.4). Допуски при изготовлении манекена включают в себя:

- отклонения формы внутренней и внешней поверхностей оболочки манекена от формы, которая определена в файле *CAD*, используемом в соответствии с требованиями настоящего стандарта;
- отклонения толщины оболочки манекена от толщины, которая определена в файле *CAD*.

Неопределенность оценивают для наихудшего случая зависимости коэффициента удельного поглощения энергии от расстояния до источника, т.е. зависимости от квадрата расстояния, при допущении, что расстояние *a* между тканеэквивалентной жидкостью манекена-головы и точкой расположения источника, создающего эквивалентную плотность тока в тканеэквивалентной жидкости составляет 10 мм (эквивалентная плотность тока не связана с ближайшим источником тока и представляет собой плотность тока, обусловленную распределением локального магнитного поля):

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = 100\left(\frac{(a+d)^2}{a^2} - 1\right);$$

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = 100\,\frac{2d}{a}, \quad \text{если } d << a\ ,$$

где $SAR_{uncertainty}$ — неопределенность, %;

d — максимальное отклонение толщины оболочки и формы манекена, мм;

a — расстояние между тканеэквивалентной жидкостью и точкой местоположения источника, создающего эквивалентную плотность тока в тканеэквивалентной жидкости, мм.

Значение неопределенности измерений, рассчитанное, исходя из прямоугольного распределения вероятности, вносят в соответствующую строку таблицы 3.

7.2.2.3 Положение зонда по отношению к поверхности оболочки манекена

Неопределенность измерений, обусловленная положением зонда относительно оболочки манекена d_{ph}, подлежит оценке. Составляющую неопределенности предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии рассчитывают, исходя из прямоугольного распределения вероятности, с использованием аппроксимации ошибки первого порядка:

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = \frac{d_{ph}}{\delta/2}\,100,$$

где $SAR_{uncertainty}$ — неопределенность, %;

d_{ph} — неопределенность при определении расстояния между наконечником зонда и оболочкой манекена, т. е. неопределенность при определении положения манекена по отношению к наконечнику зонда;

δ — минимальная глубина зондирования, мм, для тканеэквивалентных жидкостей в соответствии с требованиями настоящего стандарта, т.е. $\delta \approx 14$ мм при частоте 3 ГГц.

Неопределенность коэффициента удельного поглощения энергии, рассчитанная исходя из прямоугольного распределения вероятности, указывается в третьей колонке таблицы неопределенности измерений.

7.2.2.4 Неопределенность измерений, обусловленная положением испытуемого устройства и его держателем

Держатель предназначен для удержания испытуемого устройства в правильном положении относительно манекена во время измерения коэффициента удельного поглощения энергии. Так как держатель способен повлиять на характеристики испытуемого устройства, требуется оценка неопределенности измерения коэффициента удельного поглощения энергии, обусловленной смещением держателя устройства, которая осуществляется в соответствии с 7.2.2.4.1. Порядок оценки неопределенности коэффициента удельного поглощения энергии, обусловленной нестабильностью позиционирования в результате технологических отклонений держателя, описан в 7.2.2.4.2. Оба подпункта рассматривают порядок определения относящихся к конкретным испытуемым устройствам и заранее заданных значений неопределенности измерений. При использовании заранее заданных значений неопределенности измерений в большинстве случаев допускается неоднократное повторение испытаний конкретных устройств с целью последовательного уменьшения задаваемых значений стандартных отклонений.

7.2.2.4.1 Неопределенность, обусловленная смещением держателя

Держатель испытуемого устройства изготавливается из диэлектрического материала с малыми потерями с диэлектрической проницаемостью менее 5 и тангенсом угла потерь менее 0,05 (указанные параметры материала можно проверить, например, с помощью коаксиального контактного пробника). Но даже при соблюдении этих условий некоторые держатели влияют на источник излучения, поэтому неопределенность, обусловленная держателем (т.е. отклонение от параметров, предусмотренных без учета держателя) подлежит оценке. Неопределенность для конкретного испытуемого устройства оценивают с использованием метода, установленного в 7.2.2.4.1.1, то есть по типу В. В 7.2.2.4.1.2 описан метод оценки по типу А неопределенности измерений для группы устройств со сходными характеристиками удельного поглощения, испытываемыми с использованием одного и того же держателя.

7.2.2.4.1.1 Оценка неопределенности измерений, обусловленной смещением держателя для конкретного испытуемого устройства: тип В

Неопределенность измерений для конкретного испытуемого устройства, работающего в установленной конфигурации, оценивают с помощью следующих двух испытаний, проводимых с использованием плоского манекена:

a) Оценкой предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии $SAR_{w/holder}$ испытуемого устройства, закрепленного в держателе в том же положении, в каком он закрепляется при проведении испытаний, с последующим приведением испытуемого устройства в непосредственный контакт с плоским манекеном так, чтобы горизонтальная и центральная вертикальная линии испытуемого устройства были параллельны днищу манекена.

b) Оценка предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии $SAR_{w/o\ holder}$ испытуемого устройства, находящегося в том же положении, но удерживаемом в нем с помощью пенополистирола или эквивалентного ему неотражающего материала с низкими потерями (диэлектрическая проницаемость не более 1,2, тангенс угла потерь — не более 10^{-5}).

Неопределенность коэффициента удельного поглощения энергии $SAR_{uncertainty}$, %, вносимую в таблицу 3, рассчитывают по формуле

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = \left(\frac{SAR_{w/holder} - SAR_{w/o\,holder}}{SAR_{w/o\,holder}}\right) 100,$$

где $SAR_{w/holder}$ — коэффициент удельного поглощения энергии с держателем, Вт/кг;

$SAR_{w/o\ holder}$ — коэффициент удельного поглощения энергии без держателя, Вт/кг.

Данную неопределенность рассчитывают при условии, что имеет место прямоугольное распределение вероятности при бесконечном числе степеней свободы, $v_i = \infty$.

7.2.2.4.1.2 Оценка неопределенности измерений, обусловленной смещением держателя, для конкретного испытуемого устройства: тип А

Анализ неопределенности измерений по типу А может выполняться в отношении группы испытуемых устройств с одинаковой формой и параметрами распределения значений удельного поглощения энергии. Значение неопределенности измерений, вычисляемое с помощью данного типа анализа, может применяться и к другим испытуемым устройствам с аналогичными характеристиками удельного поглощения, испытываемым с помощью того же держателя, что дает возможность избежать проведения их испытаний, описанных в 7.2.2.4.1.1. Влияние держателя для N разных моделей испытуемых устройств с разными конфигурациями оценивают путем проведения испытаний, описанных в 7.2.2.4.1.1 на каждой модели (число N должно быть не менее шести); при этом для каждой конфигурации:

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = \left(\frac{SAR_{w/holder} - SAR_{w/o\,holder}}{SAR_{w/o\,holder}}\right) 100,$$

где $SAR_{uncertainty}$ — неопределенность, %;

$SAR_{w/holder}$ — коэффициент удельного поглощения с держателем, Вт/кг;

$SAR_{w/o\ holder}$ — коэффициент удельного поглощения энергии без держателя, Вт/кг.

Соответствующее значение неопределенности измерений, подлежащее внесению в таблицу 3, рассчитывают с использованием среднеквадратического значения индивидуальных неопределенностей при допущении, что число степеней свободы $v_i = N - 1$. Учитывая изменение конструкции испытуемых устройств, рекомендуется обновлять базу данных ежегодно.

7.2.2.4.2 Неопределенность измерений, обусловленная положением испытуемого устройства, при использовании конкретного держателя испытуемого устройства: тип А

Отклонение реального положения испытуемого устройства от положения, установленного в настоящем стандарте, зависит от точности средств позиционирования устройства, а также от понимания требований настоящего стандарта лицом, проводящим испытание. Помимо этого, значение данного отклонения и его влияние на предельные пространственно усредненные значения коэффициента удельного поглощения энергии зависят от конструкции испытуемых устройств. Поскольку все эти параметры неразделимы, требуется проведение описанных ниже испытаний по типу А.

7.2.2.4.2.1 Неопределенность позиционирования конкретного испытуемого устройства в конкретном держателе

Для конфигураций и положений испытуемых устройств, оцениваемых при измерении предельного пространственно усредненного удельного поглощения энергии, проводят не менее четырех дополнительных испытаний с тем, чтобы общее число испытаний N было ≥ 5. Выраженное в процентах стандартное отклонение среднего значения рассчитывают при условии, что число степеней свободы $v_i = N - 1$.

7.2.2.4.2.2 Неопределенность позиционирования конкретных типов испытуемых устройств в конкретном держателе

Анализ неопределенности измерений по типу А может быть проведен применительно к группе из M испытуемых устройств с одинаковой формой и параметрами распределения коэффициента удельного поглощения энергии. Число M должно быть не менее шести, при этом каждое из M испытаний выполняется N раз в соответствии с требованиями 7.2.2.4.2.1. Половину из M испытаний выполняют с устройством в положении «вдоль щеки», а вторую половину — с устройством в «наклонном» положении. Соответствующую неопределенность оценивают с использованием среднеквадратического значения M индивидуальных стандартных отклонений. Значение неопределенности, подлежащее занесению в таблицу 3, должно представлять собой стандартную неопределенность при $k = 1$ и соответствовать доверительной вероятности 68 %. Число степеней свободы $v_i = (N \cdot M) - 1$. При определении неопределенности измерений с помощью данной процедуры испытания отдельно взятых устройств в соответствии с 7.2.2.4.2.1 могут не потребоваться. Учитывая изменение конструкции испытуемых устройств, рекомендуется обновлять базу данных ежегодно.

7.2.3 Влияние физических параметров

7.2.3.1 Введение

Методы испытаний диэлектрических параметров подробно описаны в приложении J, а методы вычисления неопределенности измерений — в J.7 того же приложения.

Примечание — Рекомендуется, чтобы неопределенность измерений каждого из диэлектрических параметров не превышала допустимого отклонения от заданных значений измеряемых диэлектрических параметров.

7.2.3.2 Плотность жидкости

Предполагается, что плотность тканеэквивалентных жидкостей с соответствующими электромагнитными параметрами равна 1000 кг/м^3. Данное значение плотности используется при определении коэффициента удельного поглощения энергии.

7.2.3.3 Проводимость жидкости

Неопределенность, связанная с проводимостью жидкости, имеет два источника. Первый источник неопределенности измерений — допустимое отклонение ± 5 % заданного значения, представленного в таблице 1; второй источник неопределенности измерений — методы измерения проводимости. Оценку неопределенности измерений проводят с учетом прямоугольного распределения вероятности (см. приложение J, раздел J.7).

7.2.3.4 Диэлектрическая проницаемость жидкости

Неопределенность, связанная с диэлектрической проницаемостью жидкости, имеет два источника. Первый источник неопределенности измерений — допустимое отклонение ± 5 % заданного значения, представленного в таблице 1; второй источник неопределенности измерений — методы измерения диэлектрической проницаемости. Оценку неопределенности измерений проводят, исходя из прямоугольного распределения вероятности (см. приложение J, раздел J.7).

7.2.3.5 Колебания выходной мощности испытуемого устройства, параметров зонда, температуры и влажности

Учет отклонений и ухода параметров, вызываемых электронной частью испытуемого устройства и измерительного оборудования, а также температурой и влажностью, проводят на первом и последнем

этапах процесса измерений, предусмотренного 6.3; при этом допустимым является отклонение ± 5 %. При оценке отклонений принимается прямоугольное распределение вероятности.

7.2.3.6 Отклонения окружающих условий

Отклонения окружающих условий возникают под воздействием различных факторов:

- отражение электромагнитных волн в помещении испытательной лаборатории;
- влияние электромагнитных свойств оболочки манекена и держателя испытуемого устройства;
- естественный уровень внешних электромагнитных полей.

Допустимое отклонение составляет ± 3 %; при оценке неопределенности принимается прямоугольное распределение вероятности.

7.2.4 Неопределенность, обусловленная последующей обработкой данных

7.2.4.1 Введение

В настоящем подпункте описывается порядок оценки неопределенности измерений, которая обусловлена последующей обработкой дискретных данных измерений, предназначенных для вычисления предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии, приведенного к 1 и 10 г ткани, т.е. суммарной стандартной неопределенности измерений, связанной с алгоритмами интерполяции, экстраполяции, усреднения и поиска максимума. Эти алгоритмы могут вводить неопределенность, обусловленную общими допущениями относительно характеристик поля, и, следовательно, не позволяют точно учесть параметры распределения электрического поля, генерируемого конкретным испытуемым устройством, в тканеэквивалентной жидкости. Неопределенность, обусловленная алгоритмами, связана с решениями, принимаемыми при измерениях, и методами последующей обработки данных *сканирования по площади* и *сканирования с высоким разрешением*.

Реальное распределение коэффициента удельного поглощения энергии в области предельных значений в значительной степени зависит от рабочей частоты, конструкции испытуемого устройства, положения, в котором проводятся его испытания и близости к тканеэквивалентной жидкости. Распределение коэффициента удельного поглощения может иметь как довольно малый градиент (если источник сигнала низкой частоты находится на большом удалении), так и очень большой градиент (если малоразмерный источник сигналов высокой частоты, как например спиральная антенна, находится в непосредственной близости к ткани). В некоторых случаях коэффициент удельного поглощения энергии имеет максимальное значение не на поверхности манекена из-за ослабления магнитных полей на поверхности [36].

Приведенные ниже функции распределения коэффициента удельного поглощения энергии позволяют имитировать данные условия и предназначены для вычисления неопределенности измерений. Эти выведенные опытным путем опорные функции используются для генерирования искусственных или «фиктивных» наборов данных об удельном поглощении энергии, предназначенных для проверки подпрограмм последующей обработки, используемых системным программным обеспечением. Контрольные значения функций, вычисляемые с применением крупной и мелкой расчетных сеток, тех же, которые применяются при проведении измерений, вводятся в программное обеспечение, предназначенное для оценки удельного поглощения энергии. Значения коэффициента удельного поглощения энергии в узловых точках сеток, соответствующих измерительным сеткам *сканирования по площади* и *сканирования с высоким разрешением*, вычисляют, исходя из трех типов распределения коэффициента удельного поглощения энергии, описанных в 7.2.4.2, и обрабатывают с применением системных алгоритмов интерполяции, экстраполяции и интеграции, как если бы они были реальными измеренными значениями. Результирующие значения коэффициента удельного поглощения энергии, приведенные к 1 и 10 г ткани, сравнивают с контрольными значениями коэффициента удельного поглощения энергии, перечисленными в 7.2.4.2. Порядок оценки неопределенности коэффициента удельного поглощения энергии, обусловленной алгоритмами последующей обработки данных *сканирования по площади* и *сканирования с высоким разрешением*, приведен в 7.2.4.3. Функции, применяемые при проведении испытаний, построены при допущении о плоской форме поверхностей тканеэквивалентной жидкости и манекена. Порядок применения этих функций к сопряжениям с искривленной формой рассматривается в 7.2.4.4. Данная концепция определения неопределенности измерений основана на допущении об отсутствии ошибок в местоположении точек сетки, рассчитанных с использованием аналитических функций распределения; при этом неопределенность измерений, обусловленную положением зонда, не учитывают.

7.2.4.2 Функции, применяемые при проведении оценочных испытаний

Чтобы в полной мере отразить картину распределения значений коэффициента удельного поглощения энергии для устройств, испытываемых в соответствии с требованиями настоящего стандарта, применяют три аналитические функции: f_1, f_2 и f_3. Функция пространственно пологого распределения f_1 и функ-

ция пространственно резкого распределения f_3 дают возможность охватить весь ожидаемый диапазон значений градиентов поля при измерении коэффициента удельного поглощения энергии испытуемого устройства. Функция f_2 позволяет учитывать условия воздействия с ослаблением магнитного поля на границе поверхности манекена и тканеэквивалентной жидкости. Функции распределения определены для поверхности манекена со значением $z = 0$, а для тканеэквивалентной жидкости — для всех случаев $z > 0$:

$$f_1(x, y, z) = Ae^{\frac{z}{2a}} \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{5a}\right);$$

$$f_2(x, y, z) = Ae^{-\frac{z}{a}} \frac{a^2}{a^2 + x'^2}\left(3 - e^{-\frac{2z}{a}}\right)\cos^2\left(\frac{\pi}{2}\frac{y'}{3a}\right);$$

$$f_3(x, y, z) = A\frac{a^2}{\frac{a^2}{4} + x'^2 + y'^2}\left(e^{\frac{2z}{a}} + \frac{a^2}{2(a + 2z)^2}\right),$$

где $x' = x + d$, мм;

$y' = y + d$, мм;

d — параметр отклонения;

a = 20 мм;

A = 1 Вт/кг.

Приведенные выше параметры a и A не имеют физического смысла, кроме использования при генерировании соответствующих распределений коэффициента удельного поглощения энергии. Так, например, значение d = 2,5 мм обеспечивает боковое смещение распределения удельного поглощения, при котором области предельных значений не совпадают с измерительной сеткой с шагом 5 мм. Этот сдвиг предназначен для проверки подпрограмм поиска точек с предельными значениями и оценки неопределенности, связанной с программным обеспечением. Контрольные значения коэффициента удельного поглощения энергии функций распределения f_1, f_2 и f_3 для кубов, соответствующих 1 и 10 г ткани, соотнесенные с координатными осями x, y, z, указаны в таблице 2. Эти контрольные значения используются в последующих подразделах для проверки других функций обработки результатов измерений.

Таблица 2 — Контрольные значения коэффициента удельного поглощения энергии, предназначенные для оценки неопределенности измерений при обработке результатов измерений

Функция	Контрольное значение *SAR*, Вт/кг	
	Куб 1 г ткани	Куб 10 г ткани
f_1	0,881	0,759
f_2	1,796	1,375
f_3	3,049	1,385

7.2.4.3 Оценка неопределенности, связанной с алгоритмами обработки данных

7.2.4.3.1 Оценка неопределенности измерений, связанной с грубым *сканированием по площади*

Для оценки предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии с заданной неопределенностью измерений необходимо, чтобы область максимального воздействия определялась на основе данных *сканирования по площади* с такой степенью точности, чтобы предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии полностью укладывалось в объем *сканирования с высоким разрешением*. Иными словами, алгоритмы интерполяции *сканирования по площади* должны обеспечивать определение областей с предельными значениями коэффициента удельного поглощения энергии с точностью $\pm L_z / 2$ мм или выше, где L_z — длина стороны объема, используемого для *сканирования с высоким разрешением*. При выполнении этого условия, что должно быть проверено в порядке, описанном в настоящем подпункте, неопределенность измерений, связанная со *сканированием по площади*, не влияет на суммарную неопределенности измерений.

Контрольные значения функции, рассчитываемые в обычных точках сетки *сканирования по площади*, закладывают в системное программное обеспечение. Алгоритм интерполяции использует контрольные точки, как если бы они были определены для проведения *сканирования по площади*, и устанавливает область с предельным значением коэффициента удельного поглощения (x_{eval}, y_{eval}). Полученный результат сравнивают с реальным местоположением точки с предельным значением, установленным с помощью аналитической функции при (x_{ref}, y_{ref}) = (–2,5, –2,5) мм, если d = 2,5 мм. Нижние индексы «*eval*» и «*ref*» означают соответственно «оцененное» и «контрольное». Иными словами, удовлетворяются условия следующих неравенств:

$$| x_{ref} — x_{eval} | \leq L_z / 2 \text{ мм};$$

$$| y_{ref} — y_{eval} | \leq L_z / 2 \text{ мм}.$$

Возможность точного определения областей с предельными значениями коэффициента удельного поглощения энергии с помощью двухмерного *сканирования по площади* зависит от пространственного разрешения Δx, Δy сетки *сканирования по площади*, пространственного разрешения Δx_i, Δy_i интерполированных величин, а также типа функций интерполяции $g_i(x)$, $g_i(y)$. Кроме того, возможность точного определения областей с предельными значениями коэффициентов *SAR* зависит от положения измерительной сетки относительно реальных точек с предельными значениями x_{ref}, y_{ref} и числа используемых точек измерения N_x, N_y.

Неопределенность, связанная с алгоритмами интерполяции, применяемыми при проведении *сканирования по площади* в целях определения областей с предельными значениями коэффициента удельного поглощения энергии, оценивают в следующей последовательности:

a) Выбирают шаг измерения Δx, Δy и число точек измерения N_x, N_y (по числу контрольных точек). Центр области сканирования по площади настраивают на (x_0, y_0) = (0, 0).

b) Значения коэффициента удельного поглощения вычисляют с помощью функций f_1, f_2 и f_3 в точках измерительной сетки *сканирования по площади* в следующих пределах:

$$x_0 - \Delta x\,[(N_x - 1)/2] \leq x \leq x_0 + \Delta x\ \ [(N_x - 1)/2];$$

$$y_0 - \Delta y\,[(N_y - 1)/2] \leq y \leq y_0 + \Delta y\,[(N_y - 1)/2],$$

где N_x и N_y принимают за нечетные целые числа. При этом z = 0, так как применительно к этим трем функциям местоположение области с предельным значением не зависит от значения z.

c) Значения коэффициента удельного поглощения энергии, вычисленные с помощью трех функций распределения, интерполируются системой измерения коэффициента удельного поглощения с пространственным разрешением Δx_i, Δy_i в соответствии с функциями интерполяции $g_i(x)$, $g_i(y)$, используемыми системой для определения области с предельным значением коэффициента удельного поглощения энергии x_{eval}, y_{eval}. Если измерительная система не позволяет импортировать значения коэффициента удельного поглощения энергии для проведения вычислений, тот же алгоритм реализуется независимо, с использованием иных средств определения значений неопределенности измерений, вводимой интерполяцией и поиском предельных значений.

d) Область с предельным значением коэффициента удельного поглощения энергии, определенная с помощью алгоритмов интерполяции, должна удовлетворять следующим неравенствам:

$$| x_{ref} — x_{eval} | \leq L_z / 2 \text{ мм};$$

$$| y_{ref} — y_{eval} | \leq L_z / 2 \text{ мм}.$$

В противном случае измерения проводят повторно, начиная с перечисления b); при этом система обработки данных и измерительная система должны использовать сетку с большим разрешением и/или большее число точек интерполяции.

e) Центр *сканирования по площади* (x_0, y_0) перемещается с шагом 1 мм в пределах $0 < x_0 \leq \Delta x/2$ и $0 < y_0 \leq \Delta y/2$ для проведения применительно к каждому центру сканирования (x_0, y_0), перенесенному в указанных пределах, повторных измерений, начиная с перечисления b).

7.2.4.3.2 Оценка неопределенности измерений, вводимой *сканированием с высоким разрешением*

Неопределенность, связанная со *сканированием с высоким разрешением*, оценивается сравнением наибольших значений коэффициента удельного поглощения энергии, приведенных к 1 или 10 г ткани, с контрольными значениями коэффициента удельного поглощения, указанными в 7.2.4.2. Точка предельного значения *SAR* (x_{ref}, y_{ref}), определенная на основе процедуры *сканирования по площади* в соответствии с 7.2.4.3.1, будет смещена от расчетной точки предельного значения *SAR* (x_{eval}, y_{eval}) на величину, определяемую следующими неравенствами:

$$| x_{ref} - x_{eval} | \le L_z / 2 \text{ мм};$$

$$| y_{ref} - y_{eval} | \le L_z / 2 \text{ мм}.$$

Данный перенос учитывают в контрольных функциях f_1, f_2 и f_3, предусмотренных 7.2.4.2, включением расстояния d. Поскольку на практике этот перенос будет неодинаковым, значение d должно изменяться в диапазоне:

$$| d | \le (L_z - L_c) / 2,$$

где L_c — длина стороны куба (10 мм для куба массой 1 г и 21,5 мм — для куба массой 10 г).

Для каждого значения расстояния d регистрируют наибольшую неопределенность, полученную с использованием любой из трех функций. Среднеквадратическое значение наибольших неопределенностей для нескольких значений расстояния d регистрируют как неопределенность, обусловленную экстраполяцией, интерполяцией и интегрированием.

Примечание — Хотя для *сканирования по площади* действует требование, согласно которому локальное максимальное значение коэффициента удельного поглощения энергии должно быть в пределах $| d | \le L_z / 2$, в данном случае используется меньший диапазон значений $| d | \le (L_z - L_c) / 2$. Это сделано для того, чтобы расчет локального максимального значения *SAR* мог быть проведен с первой попытки. При значениях $(L_z - L_c) / 2 < | d | \le L_z / 2$ измерительное программное обеспечение должно генерировать сообщение о том, что вычисления для куба массой 1 или 10 г не проведены и необходимы повторные измерения. Это не оказывает влияния на неопределенности измерений, поэтому нет необходимости рассматривать этот случай в настоящем разделе.

a) Выбирают значение расстояния d для расчета функций f_1, f_2 и f_3. Значение d должно изменяться от $-(L_z - L_c)/2$ до $+(L_z - L_c)/2$ с небольшим шагом (например 1 мм). Кроме того, изменение значения d должно происходить раздельно в направлениях x и y.

b) Значения коэффициента удельного поглощения энергии вычисляют с использованием функций f_1, f_2 и f_3 в точках измерительной сетки, соответствующих вычисленным точкам объема *сканирования с высоким разрешением*. Объем *сканирования с высоким разрешением* центрируют так, чтобы было выполнено следующее условие:

$$(x, y, z) = (0, 0, L_h/2 + d_{bo}),$$

где L_h — высота объема *сканирования с высоким разрешением*;

d_{bo} — расстояние от внутренней поверхности до ближайшей контрольной точки.

c) Системное программное обеспечение экстраполирует вычисленные значения коэффициента удельного поглощения энергии на поверхность манекена при $z = 0$, чтобы получить дополнительные точки объема *сканирования с высоким разрешением*, значения в которых не могут быть измерены из-за их недоступности для зонда. Вычисленные и экстраполированные точки интерполируются системным программным обеспечением на сетку с большим разрешением, после чего применяются алгоритмы интегрирования и поисковый алгоритм, позволяющий найти в объеме *сканирования с высоким разрешением* предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии и определить наибольшее значение коэффициента удельного поглощения для 1 или 10 г ткани. Возможно применение и других процедур. Если система не позволяет вносить значения коэффициента удельного поглощения для проведения вычислений, тот же алгоритм реализуется независимо, с использованием иных средств определения значений неопределенности измерений, вводимой алгоритмами экстраполяции, интерполяции и интегрирования.

d) Значения коэффициента удельного поглощения энергии для 1 и 10 г ткани, определенные системой или обрабатывающим программным обеспечением SAR_{eval}, сравнивают с контрольными значениями

коэффициента удельного поглощения, приведенными в 7.2.4.2. Отклонение коэффициента удельного поглощения энергии для каждой функции распределения вычисляют с помощью уравнения:

$$SAR_{uncertainty}\,[\%] = 100\left|\frac{SAR_{eval} - SAR_{ref}}{SAR_{ref}}\right|,$$

e) Наибольшее отклонение коэффициента удельного поглощения энергии, вычисленное с помощью любой из трех функций распределения, регистрируют.

f) Повторяют шаги по перечислениям b) — d) с другими значениями переноса *d*.

g) Определяют среднеквадратические значения неопределенностей измерений, вычисленных при выполнении шага по перечислению d) с использованием каждого из упомянутых выше значений переноса *d*. Эти значения заносят в соответствующие строку и колонку таблицы 3 как неопределенности, обусловленные экстраполяцией, интерполяцией и интегрированием.

h) Регистрируют следующие параметры, используемые при оценке неопределенности измерений, обусловленные *сканированием с высоким разрешением*:

- параметры сетки, используемой для выбора контрольных функций, как по числу точек, так и по числу шагов в трех измерениях;
- число точек интерполяции между двумя контрольными точками или дискретность интерполяции в трех направлениях для всех контрольных функций;
- параметр d_{be} области экстраполяции, т. е. расстояние между местоположением датчиков зонда в первой контрольной точке и поверхностью манекена (контрольная точка находится за наконечником зонда);
- используемые алгоритмы интерполяции, экстраполяции и интегрирования усреднения.

Условия проведения вычислений (например число точек сетки, дискретность сетки и число точек интерполяции в трех направлениях) должно быть одинаковым для всех функций.

7.2.4.4 Оценка неопределенности измерений, обусловленной кривизной поверхностей

Требования 7.2.4.3 основаны на допущении о том, что граница тканеэквивалентной жидкости и поверхности манекена является плоской. Вместе с тем неопределенность измерений, оцененная с помощью описанных функций для плоской границы тканеэквивалентной жидкости и манекена, применима также к плавно искривленным поверхностям. Тот факт, что функция учитывает плоскую форму поверхности, не накладывает каких-либо ограничений на ее применимость для испытаний, при условии, что процедура испытания предполагает использование одинаковых расстояний между сеткой и поверхностями. В результате образуются усредняющие объемы, показанные на рисунке 10. На рисунке 10 иллюстрирован также допустимый метод конфигурирования куба при обработке результатов измерений коэффициентов удельного поглощения энергии. Передняя поверхность куба, обращенная к сопряжению манекена и жидкости, имеет ту же форму, что и искривленная граница, что обеспечивает захват всех предельных значений коэффициента удельного поглощения энергии. Задняя поверхность искривляется в равной степени, чтобы обеспечить сохранение правильной усредняющей массы. Плоскость и ориентация четырех боковых поверхностей куба остаются неизменными.

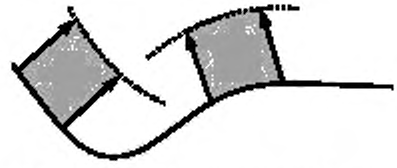


Рисунок 10 — Поверхности усредняющего объема и их ориентация относительно поверхности манекена

7.3 Оценка неопределенности измерений

7.3.1 Суммарная стандартная и расширенная неопределенность измерений

Вклады каждого элемента неопределенности должны быть зарегистрированы с учетом описания влияющей величины, распределения вероятности, коэффициента влияния и значения неопределенности. При этом рекомендуется использовать форму таблицы 3. Суммарную стандартную неопределенность u_c рассчитывают по формуле

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} c_i^2 u_i^2},$$

где c_i — коэффициент влияния;

u_i — стандартная неопределенность.

Расширенную неопределенность U рассчитывают с использованием доверительного интервала 95 %.

7.3.2 Максимальная расширенная неопределенность

Расширенная неопределенность измерений при доверительном интервале 95 % не должна превышать 30 % предельных пространственно усредненных значений измерений коэффициента удельного поглощения энергии, находящихся в пределах от 0,4 до 10 Вт/кг. Если неопределенность измерений составляет более 30 %, в протоколе должна быть зарегистрирована выраженная в процентах разница между реальной неопределенностью измерений и заданным 30-процентным значением.

Таблица 3 — Оценка неопределенности измерений при проверке коэффициента удельного поглощения энергии ручных абонентских устройств (шаблон)

a	*b*	*c*	*d*	*e = f (d,k)*	*f*	*g*	*h = cf / e*	*i = cg / e*	*k*
Источник неопределенности измерений	Описание	Допуск/ неопределенность, ± %	Распределение	Div.	c_i (1 г)	c_i (10 г)	Стандартная неопределенность ± %,1 г	Стандартная неопределенность ± %,10 г	v_i или v_{eff}
Измерительная система									
Градуировка зонда	7.2.1		*N*	1	1	1			∞
Изотропия	7.2.1.2		*R*	√3	1	1			∞
Граничный эффект	7.2.1.5		*R*	√3	1	1			∞
Линейность	7.2.1.3		*R*	√3	1	1			∞
Пределы измерения	7.2.1.4		*R*	√3	1	1			∞
Считывающая электроника	7.2.1.6		*N*	1	1	1			∞
Время реакции	7.2.1.7		*R*	√3	1	1			∞
Время накопления	7.2.1.8		*R*	√3	1	1			∞
Радиочастотная обстановка – шум	7.2.3.6		*R*	√3	1	1			∞
Радиочастотная обстановка – отражения	7.2.3.6		*R*	√3	1	1			∞
Механические ограничения устройства позиционирования зонда	7.2.2.1		*R*	√3	1	1			∞
Положение зонда относительно оболочки манекена	7.2.2.3		*R*	√3	1	1			∞
Последующая обработка данных	7.2.4		*R*	√3	1	1			∞

Продолжение таблицы 3

a	*b*	*c*	*d*	*e = f (d,k)*	*f*	*g*	*h = cf / e*	*i = cg / e*	*k*
Источник неопределенности измерений	Описание	Допуск/ неопределенность, ± %	Распределение	Div.	c_i (1 г)	c_i (10 г)	Стандартная неопределенность ± %,1 г	Стандартная неопределенность ± %,10 г	v_i или v_{eff}
Образец для испытаний									
Положение проверяемого образца	7.2.2.4		*N*	1	1	1			*M*-1
Неопределенность, вводимая держателем	7.2.2.4.2		*N*	1	1	1			*M*-1
Отклонения выходной мощности	7.2.3.5		*R*	√3	1	1			∞
Манекен и конфигурация									
Неопределенность, вводимая манекеном (допуски на форму и толщину)	7.2.2.2		*R*	√3	1	1			∞
Проводимость жидкости (заданная)	7.2.3.3		*R*	√3	0,64	0,43			∞
Проводимость жидкости (измеренная)	7.2.3.3		*N*	1	0,64	0,43			M
Диэлектрическая проницаемость жидкости (заданная)	7.2.3.4		*R*	√3	0,6	0,49			∞
Диэлектрическая проницаемость жидкости (измеренная)	7.2.3.4		*N*	1	0,6	0,49			*M*
Суммарная стандартная неопределенность			*RSS*						
Расширенная неопределенность (доверительный интервал 95 %)									

Примечания

1 Заголовки колонок *a* — *k* приведены для удобства ссылок.

2 Сокращения, используемые в настоящей таблице:

- *RSS* — корень квадратный из суммы квадратов;
- *N, R* — распределения вероятностей: нормальное и прямоугольное соответственно;
- Div. — делитель, используемый для получения стандартной неопределенности измерений.

3 Элементы неопределенности измерений, представленные в таблице, учитывают процедуры и протоколы испытаний, установленные для целей настоящего стандарта. При использовании отличающихся протоко-

Окончание таблицы 3

лов и процедур испытаний может потребоваться учет других элементов неопределенности измерений, например, параметров, рассчитанных на другие конфигурации манекена и положения испытуемого устройства.

4 Делитель зависит от функции распределения вероятностей и числа степеней свободы v_i и v_{eff}.

5 c_i — коэффициент влияния, применяемый для преобразования показателя изменяемости элемента неопределенности измерений в показатель изменяемости коэффициента удельного поглощения.

6 См. 7.1.3 о числе степеней свободы v_i, используемом при определении стандартной неопределенности измерений, и эффективном числе степеней свободы v_{eff}, используемом при определении расширенной неопределенности измерений.

7 Значение *M* в колонке v_i представляет собой число испытаний.

8 Промежуточное отклонение значения диэлектрической проницаемости 10 % может применяться к жидкостям на основе гликолей при частотах свыше 2 ГГц.

9 Некоторые из величин, влияющих на неопределенность, могут быть рассчитаны на основе спецификаций, предоставляемых изготовителями оборудования; некоторые другие элементы неопределенности измерений, меняющиеся от испытания к испытанию, должны рассчитываться при каждом измерении.

10 Все влияющие величины, представленные в настоящей таблице, могут быть использованы в целях *валидации системы*, кроме трех величин, образующих группу «Образец для испытаний» - вместо них используются две влияющие величины относящиеся к группе «Диполь»: «Расстояние между осью диполя и жидкостью» и «Уход параметров входной мощности и коэффициента удельного поглощения энергии».

8 Протокол испытаний

8.1 Общие положения

Результаты испытаний регистрируют в протоколе испытаний, который должен содержать информацию, необходимую для оценки результатов испытаний или градуировки, а также всю информацию, предусмотренную применяемым методом измерений. Дополнительная информация о требованиях к протоколу испытаний изложена в ИСО/МЭК 17025, подраздел 5.10.

8.2 Разделы протокола испытаний

Информация, необходимая для проведения воспроизводимых испытаний, расчетов и измерений, дающих результаты в установленных пределах градуировки и неопределенности измерений, подлежит регистрации.

Протокол испытаний должен включать в себя разделы:

a) «Общее введение», в том числе:

1) информация об испытуемом устройстве,

2) требования,

3) используемые стандарты;

b) «Измерительная система», в том числе:

1) измерительная система,

2) устройство позиционирования,

3) описание схем интерполяции/экстраполяции;

c) «Оценка неопределенности измерений» - в форме таблицы 3 (см. 7.3);

d) «Информация об испытуемом устройстве и методе испытаний», в том числе:

1) описание испытуемого устройства / серийный номер, например Международный идентификационный номер (IMEI),

2) условия проведения испытания (температура и т.д.),

3) используемые жидкости и их характеристики,

4) результаты *валидации системы*,

5) результаты выполненных испытаний (предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии для каждого испытания; графическое отображение результатов грубого сканирования, показывающее максимальное значение коэффициента удельного поглощения энергии для каждого режима испытуемого устройства);

e) «Заключительная часть», в том числе:

1) значения коэффициента удельного поглощения энергии для всех испытательных положений, диапазонов, режимов и конфигураций антенн,

2) ссылки на основные ограничительные рекомендации, декларации соответствия или иные документы (при необходимости).

Приложение А
(обязательное)

Характеристики манекена

А.1 Обоснование формы манекена

Модели частей тела — важная составляющая электромагнитной дозиметрии. Желательно, чтобы они максимально точно воспроизводили анатомические детали соответствующих частей тела человека, хотя это не всегда абсолютно необходимо или возможно. В связи с этим важно определить и стандартизировать те характеристики, параметры и свойства материалов, которые влияют на результаты измерения коэффициента удельного поглощения энергии.

Статистическая классификация анатомических форм и размеров осуществляется по результатам антропометрического обследования населения и служит основой для реалистичного определения формы манекена. Проведенное в 1988 году антропометрическое обследование личного состава армии США позволило получить данные, отражающие особенности разных возрастных, расовых и этнических групп [18]. Форма головы характеризуется рядом прямых и кривых линий, показанных на рисунке А.1.

Результаты дозиметрических исследований дают основания предполагать, что крупная голова (голова взрослого человека мужского пола) поглощает больше энергии и подвергается наибольшему воздействию, по сравнению с головой меньшего размера (женская или детская голова) [34], [35], [58]. За основу принята крупная голова, относящаяся к 90 - процентному квантилю размеров головы взрослого мужчины — это позволяет гарантировать, что более 90 % всех пользователей имеют меньший размер головы и, следовательно, подвержены меньшему воздействию.

Задний выступ уха непосредственно сказывается на прилегании ручного абонентского устройства и антенны к голове и является важным параметром при определении коэффициента удельного поглощения энергии. Выступ уха требует адаптации, позволяющей сымитировать давление, оказываемое на ухо ручным абонентским устройством. Форма уха — один из факторов, влияющих на положение ручного абонентского устройства, поэтому она должна быть выполнена так, чтобы обеспечивать его правильное и воспроизводимое позиционирование.

Практические трудности возникают при формулировании характеристик модели руки — они обусловлены невозможностью определить единое для всех ручных абонентских устройств положение руки, удерживающей устройство. Кроме того, результаты дозиметрических исследований позволяют предположить, что отсутствие модели руки обеспечивает более консервативную картину для оценки удельного поглощения энергии головой [31]. По этой причине настоящий стандарт не предусматривает использования модели руки, удерживающей испытуемое устройство при измерении коэффициента удельного поглощения.

А.2 Характеристики манекена

Параметры манекена определены на основе «Отчета Гордона» [18], перечислены в таблице А.1 и показаны на рисунке А.1. При этом таблица А.1 имеет преимущественное значение по сравнению с рисунком А.1. Дополнительное внимание должно быть привлечено к особым условиям использования испытуемых устройств, прикладываемых к уху и щеке (см. таблицу А.2). Это особенно касается опорной точки уха (*ERP*), где толщина 6 мм, включающая 2-миллиметровую оболочку, выбрана с целью моделирования внешнего уха (ушной раковины). Кроме того, эта тонкая ушная перегородка позволяет смоделировать голову пользователя с небольшими ушами и обеспечивает консервативную картину удельного поглощения. Система контрольных точек и базовых линий предназначена для корреляции положения испытуемого устройства относительно манекена (рисунок А.2). Точка *M* — опорная точка рта, *LE* — левая опорная точка уха, а *RE* — правая опорная точка уха. Опорные точки уха находятся за наружным слуховым проходом *EEC* на линии *B* — *M* (затылок-рот) и отстоят от него на 15 мм (см. рисунок А.2).

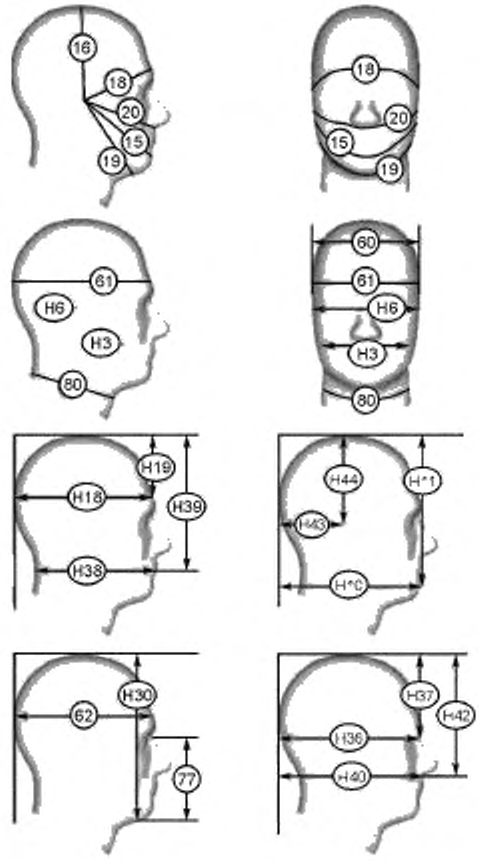


Рисунок А.1 — Иллюстрация параметров, представленных в таблице А.1

Таблица А.1 — Параметры головы, определяющие форму манекена: параметры *SAM*, соответствующие 90-процентному квантилю размеров головы взрослого мужчины в соответствии с «Отчетом Гордона» [18]

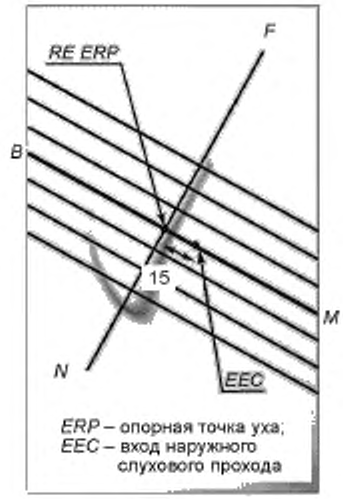
Код	Анатомический параметр	«Отчет Гордона», мм			*SAM*, мм	Отклонение, %
		Среднее значение	Стандартное отклонение	90-процентный квантиль		
H3	Ширина бигониала	118,9	7,9	129,2	130,0	0,6
H6	Ширина битрагиона	144,8	6	152,3	152,7	0,2
H10	Подбородок — затылок	194,2	10,3	207,3	206,5	–0,4
H11	Подбородок — макушка	216,8	8,9	228,3	220,4	–3,5
H18	Надпереносье — затылок	199,7	7,2	208,5	209,2	0,3
H19	Надпереносье — макушка	96,2	7,3	105,6	104,4	–1,1
H30	Краниометрическая точка — макушка	232,0	8,8	243,3	246,7	1,4
H36	Переносица — затылок	197	7,1	205,9	205,3	–0,3

Окончание таблицы А.1

Код	Анатомический параметр	«Отчет Гордона», мм			*SAM*, мм	Отклонение, %
		Среднее значение	Стандартное отклонение	90-процентный квантиль		
H37	Переносица — макушка	112	6,9	120,9	121,7	0,7
H38	Стомион — затылок	199,4	9,6	211,9	211,4	–0,2
H39	Стомион — макушка	186,3	7,8	196,3	196,3	0,0
H40	Соединение носовой перегородки и верхней губы — затылок	203,5	8,3	213,6	213,0	–0,3
H42	Соединение носовой перегородки и верхней губы — макушка	161,9	7,7	171,8	177,6	3,4
H43	Трагион — затылок	98,9	8,5	106,4	106,4	0,0
H44	Трагион — макушка	131	5,7	138,2	138,2	0,0
15	Подбородочная дуга битрагиона	325,8	13,4	343,1	329,3	–4,0
16	Венечная дуга битрагиона	353,3	12,9	369,7	367,3	–0,6
18	Передняя дуга битрагиона	304,3	10,6	318,2	314,1	–1,3
19	Подчелюстная дуга битрагиона	304,2	14,5	323,2	333,5	3,2
20	Подносовая дуга битрагиона	292	11,1	306,3	305,3	–0,3
60	Ширина головы	151,7	5,4	158,6	158,4	–0,1
61	Окружность головы	567,7	15,4	587,3	594,8	1,3
62	Длина головы	197,1	7,1	206	206,0	0,0
77	Краниометрическая точка — переносица	121,9	6,5	130,4	125,0	–4,1
80	Окружность шеи	379,6	19,7	405,3	395,4	–2,5

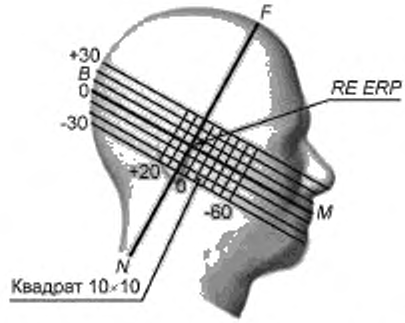
Таблица А.2 — Особые рекомендации по проектированию манекена *SAM* и применению файла автоматизированного проектирования *CAD*

Код	Рекомендации по проектированию *SAM*
SG1	Базовая плоскость определяется левым и правым трагионом и стомионом (ртом)
SG2	Опорная точка уха (*ERP*) находится в базовой плоскости, на расстоянии 15 мм от трагиона
SG3	Толщина оболочки в контрольных точках уха (*ERP*) равна 6 мм
SG4	Прямая линия *N* — *F* на внешней поверхности прямая, длиной 60 мм находится в плоскости, перпендикулярной к базовой плоскости
SG5	Линия *N* — *F* на внешней поверхности, оставаясь в плоскости, перпендикулярной к базовой плоскости, наклонена так, что в положении испытуемого устройства «вдоль щеки» точка соприкосновения между плоским испытуемым устройством и внешней поверхностью оказывается на базовой линии
SG6	Прямая линия *B* — *M* на внешней поверхности на участке от опорной точки уха (*ERP*) до верхней части уха; при этом толщина оболочки на этом участке должна быть менее 6 мм
SG7	Плоская внешняя поверхность уха определяется линиями *NN* — *F* и *B* — *MMB*; толщина оболочки должна быть 2 мм на всех участках, кроме области уха
SG8	На разрезанных плоскостях, параллельных базовой плоскости на участке от *H* –30 мм до *H* +30 мм, в районе щек не должно быть S-образного изгиба
SG9	Толщину оболочки измеряют на линии, перпендикулярной к внутренней поверхности



B — задняя конечная точка линии *B* — *M*;
F — передняя конечная точка линии *N* — *F*;
N — шейная конечная точка линии *N* — *F*;
M — опорная точка рта;
RE — правая опорная точка уха (*ERP*);

Рисунок А.2 — Крупный план манекена, вид сбоку в области уха



B — задняя конечная точка линии *B* — *M* (только для информации — отметка на манекене не требуется);
F — передняя конечная точка линии *B* — *M* (только для информации — отметка на манекене не требуется);
N — шейная конечная точка линии *N* — *F* (только для информации — отметка на манекене не требуется);
M — передняя конечная точка линии *N* — *F* (только для информации — отметка на манекене не требуется);
RE — правая опорная точка уха (*ERP*)

Примечание — Манекен представлен в виде цельной головы исключительно для иллюстрации. Процедуры, предусмотренные настоящим стандартом, рассчитаны, главным образом, на манекен конфигурацией, показанной на рисунке 2.

Рисунок А.3 — Вид манекена сбоку с соответствующими отметками

Плоскость, проходящая через две опорные точки уха и точку *M*, принята за опорную плоскость. Линия *N* — *F* (шея — передняя часть), проходящая вдоль переднего среза уха, принята за опорную линию вращения. Линии *N* — *F* и *B* — *M* наносят на внешнюю поверхность оболочки манекена для облегчения установки испытуемого устройства в правильное положение. За линией *N* — *F* в области опорной точки уха *ERP*, толщина оболочки манекена, имеющей в этой области форму плоского уха, равна 6 мм. Перед линией *N* — *F* ухо срезано, как показано на рисунке А.2. Это сделано для того, чтобы долька ушной раковины не препятствовала наклону испытуемого устройства, что может привести к неустойчивости положения испытуемого устройства у щеки.

Проекции опорной линии *B* — *M* и опорной линии *N* — *F* наносятся на манекен. Нанесение дополнительных линий не обязательно, но может быть выполнено для удобства. Гравировка на внешней поверхности манекена дополнительных отметок, показанных на рисунке А.3, не влияет на его характеристики.

А.3 Тканеэквивалентные жидкости

Для разработки составов однородных жидкостей с заданными характеристиками используют простую аналитическую модель бесконечной полупространственной многослойной ткани, находящейся под воздействием

плоских волн. Эта модель позволяет исследовать влияние согласования полных сопротивлений, стоячих волн и т.д. на предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения [8]. Слои ткани неодинаковы по составу и толщине, что дает возможность воспроизвести анатомические различия между подвергаемыми воздействию областями головы и охватить разные группы пользователей, включая как взрослых, так и детей (между 10-процентным и 90-процентным квантилями). Исходя из наихудшего, с точки зрения поглощения на каждой частоте, состава слоев ткани, были определены диэлектрические параметры однородной тканеэквивалентной жидкости с тем же (или несколько более высоким) предельным значением пространственного поглощения. При этом использовались данные о диэлектрических свойствах, полученные в результате анализа по методу Коула и Коула, представленные в [17]. Применимость данного подхода к оценке воздействия поля в ближней зоне была доказана заменой расположенного в непосредственной близости к многослойным структурам источника плоских волн полуволновым диполем и четвертьволновым несимметричным вибратором, а также сравнением полученных результатов с результатами применения неоднородных моделей взрослой и детской головы, построенных на основе технологии магнитно-резонансного отображения (MRI).

Параметры диэлектрической проницаемости и проводимости полученных тканеэквивалентных жидкостей, также описанные в [8], представлены в разделе 5.2.4, таблица 1.

Для определения диэлектрических свойств тканеэквивалентных жидкостей, рассчитанных на другие частоты в пределах рабочей полосы частот, применяют линейную интерполяцию. Предлагаемые составы жидкостей приведены в приложении I.

Приложение В
(обязательное)

Градуировка (линейность, изотропия, чувствительность) оборудования и оценка неопределенности измерений

В.1 Введение

Измерительное оборудование включает в себя зонд, усилители и измерительное устройство. В имеющихся в настоящее время зондах применяются диодные приемники излучения Шоттки. Измеренный сигнал — выходной сигнал зонда — это напряжение, пропорциональное E или E^2 и зависящее от уровня радиочастотного воздействия.

Наиболее изотропные зонды имеют в своем составе три небольших дипольных датчика с ортогональными диаграммами направленности и детекторные диоды в зазоре датчиков. Общее значение напряженности электрического поля может оцениваться как корень квадратный из суммы квадратов трех составляющих напряженности электрического поля. В связанной квадратичной зависимостью области реакции диодов выходное напряжение датчиков пропорционально усредненному квадрату соответствующей составляющей поля. За пределами этой области выходной сигнал подвергается нелинейным искажениям и, следовательно, требуется лине-аризация динамического диапазона. Технологические допуски между датчиками и диодами обусловливают различия в чувствительности между датчиками.

В.2 Оценка чувствительности дипольных датчиков

Показатель чувствительности дипольных датчиков определяется с помощью процедур градуировки, осуществляемых в один или в два этапа.

В.2.1 Процедуры градуировки в два этапа

Общее значение напряженности поля вычисляется по формуле

$$|E|^2 = \sum_{i=1}^{3} |E_i|^2 = \sum_{i=1}^{3} \frac{f_i(V_i)}{\eta_i \gamma_i},$$

где $f_i(V_i)$ — функция линеаризации выпрямленного сигнала датчика V_i;

η_i — абсолютные значения чувствительности, мкВ/(В/м)^2, дипольных датчиков в свободном пространстве;

γ_i — отношения значений чувствительности датчиков зонда в среде к их значениям чувствительности в свободном пространстве.

Декомпозиция показателя чувствительности зонда на две составляющих (η_i и γ_i) позволяет использовать некоторые стандартизованные процедуры калибровки зонда в воздухе и обеспечивает дополнительную проверку рабочих параметров зонда и его настройки. Градуировка зонда допустима только на достаточном удалении от границ среды. На близком расстоянии чувствительность может меняться. Это явление называется граничным эффектом и, как и изотропия, требует отдельной оценки.

В.2.1.1 Чувствительность в воздухе (1-й этап)

Наиболее точные испытательные установки, позволяющие генерировать поля установленной напряженности и имитировать условия свободного пространства при калибровке зондов, — это установки, предусматривающие использование волноводов. Это обусловлено следующим:

- волноводные установки требуют умеренной мощности и меньше пространства, чем установки, определяющие градуировочные коэффициенты для дальней зоны;

- волноводные установки дают возможность генерировать поля с наиболее точными параметрами, фиксируемыми измерительным оборудованием;

- неопределенность измерений, обусловленная изменениями параметров поля в результате ввода зонда, пренебрежимо мала при использовании небольших зондов для ближней зоны, когда размеры волновода значительно больше размеров зонда;

- эти волноводные установки обеспечивают простоту доступа для ориентации оси зонда перпендикулярно или параллельно поляризации поля внутри установки;

- кроме того, перекрестная проверка общих значений напряженности поля может быть проведена набором волноводов с перекрывающимся полосами частот.

На более низких частотах (менее 750 МГц) можно использовать ТЕМ-камеры. Однако поле внутри ТЕМ-камер характеризуется менее очерченными границами, т.е. имеет место довольно большое отклонение от предсказываемого однородного распространения поля [44]. Так, например, в некоторых серийных ТЕМ-камерах при перемещении вдоль центральной оси от центральной пластины к внешней стенке параметры поля варьируются в пределах ± 6 %. Тем не менее, результаты сравнения параметров реакции зонда в ТЕМ-камерах и волноводах говорят о возможности градуировки в конкретных точках в ТЕМ-камере.

Обычно зонд вводится через небольшие отверстия в стенках установки и помещается в самом центре, где воздействие поля на все его поверхности наиболее однородно. Каждый датчик оценивается относительно составляющей поля, параллельной датчику.

До тех пор, пока линия с активным сопротивлением не загружает диполь и диодный датчик, а размеры зонда малы по сравнению с длиной волны, чувствительность зонда не зависит от частоты. Это обеспечивает дополнительную проверку установки и позволяет выявлять возможные случайные отклонения параметров поля, вызванные зондом. Если используются высококачественные волноводные ответвители и соответствующие источники, эффекты от ввода зонда обычно бывают пренебрежимо малы. Дополнительным источником неопределенности измерений в волноводной установке являются отражения от оконечной нагрузки, которые способны вызывать внутри установки стоячую волну. Эти отражения можно поддерживать на уровне менее 1 % применением высококачественных волноводных нагрузок. Кроме того, неопределенность может быть компенсирована проведением дополнительных измерений со смещением нагрузки на $\lambda/4$ и последующим усреднением двух показаний.

B.2.1.2 Чувствительность в среде (2-й этап)

Чувствительность в жидкости определяется путем создания в среде локального поля с известными параметрами. При этом могут применяться два метода:

- сравнительная градуировка с использованием датчиков температуры;
- градуировка с использованием аналитических полей.

B.2.1.2.1 Сравнительная градуироека с использованием датчиков температуры

В жидкостях, рассеивающих энергию, коэффициент удельного поглощения энергии определяется как напряженностью электрического поля E, так и перепадом температуры dT/dt в жидкости. Таким образом, уместно следующее соотношение:

$$SAR = \sigma \frac{E^2}{\rho} c_h \left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0}.$$

В жидкости, рассеивающей энергию, электрическое поле может быть измерено опосредованно, измерением перепада температуры в жидкости. Невозмущающие температурные датчики (оптические датчики или термисторные датчики с цепями с активным сопротивлением) с высоким пространственным разрешением (от < 1 до 2 мм) и высокой скоростью реакции (< 1 с) имеются в наличии и достаточно просто поддаются высокоточной градуировке [32]. Установка и источник возбуждения не влияют на градуировку; принимаются во внимание только относительные погрешности позиционирования стандартного температурного датчика и зонда электрического поля, подлежащих градуировке. Однако существует ряд проблем, ограничивающих точность градуировки зондов с использованием температурных датчиков:

- перепад температуры не измеряют непосредственно, а рассчитывают на основе нескольких измерений температуры, сделанных в разное время. Это расчет требует осторожности, позволяющей исключить неопределенность измерения, вводимую перепадами температуры, которые вызваны эффектами выравнивания энергии или конвекционными потоками в жидкости. Избежать этих эффектов полностью нельзя, так как само измеряемое поле нарушает температурное равновесие жидкости. Но при тщательной настройке всех параметров можно удерживать вводимую ими неопределенность измерений на уровне небольших величин;

- измеряемый объем вокруг датчика температуры определен нечетко. Трудно рассчитать количество энергии, сообщаемой зонду окружающим градиентным полем температур. Эти эффекты необходимо учитывать, так как температурные датчики градуируют в жидкости с однородными температурами;

- градуировка датчиков зависит от оценки удельной массы, теплоемкости и теплопроводности среды. В то время как удельная масса и теплоемкость могут быть точно измерены с помощью стандартных процедур (~ ± 2 % для c_h; намного точнее для ρ), стандартизованная процедура измерения теплопроводности отсутствует. Вводимая неопределенность может превышать ± 5 %, в зависимости от метода и жидкости;

- средства измерения перепадов температуры не обладают высокой чувствительностью, поэтому зачастую эти перепады измеряют при большей мощности, чем требуется для измерения напряженности электрического поля. В связи с этим необходимо учитывать эффекты нелинейности внутри системы (разные уровни мощности, составляющие поля и т.д.).

Ввиду перечисленных выше ограничений достижимой степени точности градуировки зондов электрического поля путем измерения перепадов температуры в установке с тщательно выверенными параметрами суммарная стандартная неопределенность составляет примерно ± 10 % [38]. Установка, представляющая собой сочетание измерений в волноводе и измерений температурными датчиками, представлена в [27]. Расчетная суммарная стандартная неопределенность, обеспечиваемая данной установкой, составляет ± 5 % при условии, что градуировка и реальные измерения проводятся с использованием одной и той же жидкости, и составляет от ± 7 % до ± 9 % — при несоблюдении этого условия, что вполне согласуется с оценками, приведенными в [38]. При анализе неопределенности измерений, вводимой сравнительной градуировкой с использованием температурного датчика, должны быть учтены все параметры, в соответствии с таблицей B.1.

Таблица В.1 — Анализ неопределенности измерений, обусловленной сравнительной градуировкой с использованием температурных датчиков

Источник неопределенности измерений	Значение неопределенности, ± %	Распределение вероятности	Делитель	c_i	Стандартная неопределенность u_i ± %	v_i или v_{eff}
Положение зонда электрического поля		*N*	1	1		∞
Положение температурного датчика		*N*	1	1		∞
Линейность зонда электрического поля		*R*	√3	1		∞
Уход параметров температурного датчика и шум		*R*	√3	1		∞
Линейность температурного датчика		*R*	√3	1		∞
Проводимость жидкости		*R*	√3	1		∞
Удельная теплоемкость жидкости		*R*	√3	1		∞
Плотность жидкости		*R*	√3	1		∞
Точность температурного датчик		*R*	√3	1		∞
Суммарная стандартная неопределенность		*RSS*				

Примечания

1 — c_i — коэффициент влияния.

2 — v_i, v_{eff} — число степеней свободы в стандартной неопределенности $u(x_i)$ для входных величин (x_i); эффективное число степеней свободы в суммарной стандартной неопределенности $u_c(x_i)$, используемой при определении $t_p(v_{eff})$ соответственно.

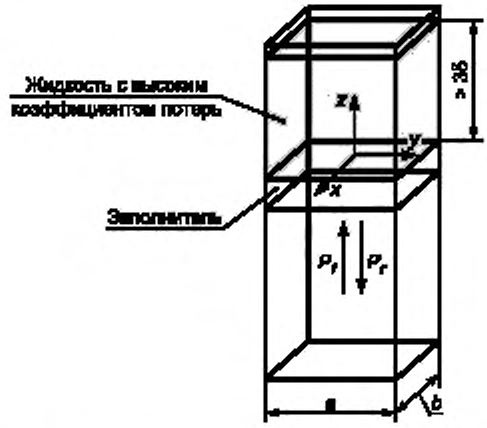
В.2.1.2.2 Градуировка с использованием аналитических полей (волноводов)

Данный метод применяется в испытательной установке, если параметры поля могут быть рассчитаны аналитическими методами на основе результатов измерения других физических величин (например, входной мощности). Этот метод соответствует методу опорного поля, применяемому для градуировки зонда в воздухе; однако стандартизованного метода, регламентирующего порядок измерения параметров поля в жидкостях, рассеивающих энергию, не существует.

Если для градуировки зонда и оценки неопределенности измерений используются параметры поля, рассчитанные в жидкостях, рассеивающих энергию, должны быть учтены несколько важных моментов:

- испытательная установка должна обеспечивать точное измерение мощности падающей волны;
- точность рассчитанной напряженности поля зависит от оценки диэлектрических свойств жидкости;
- из-за малой длины волны в жидкостях с высокой диэлектрической проницаемостью даже небольшие установки с малыми физическими размерами могут иметь частоты выше предельных частот резонансной моды; распределение поля в испытательной установке должно быть тщательно проверено на соответствие теоретическому распределению поля.

Прямоугольные волноводы — это замкнутые системы, в которых поперечные распределения полей не зависят от отражений. Волноводы могут использоваться для генерирования в тканеэквивалентных жидкостях аналитических полей, как это предусмотрено в установке, представленной в [52]. В этой установке (см. рисунок В.1) верхняя часть установленного в вертикальное положение волновода с открытым концом заполнена жидкостью. Диэлектрическая пластина, находящаяся на расстоянии > λ от питающего ответвителя, обеспечивает согласование полного сопротивления (потери при отражении >10 дБ) между воздухом и жидкостью. Симметричность конструкции и высокий коэффициент потерь тканеэквивалентной жидкости гарантируют распределение поля в жидкости в соответствии с типом волны в волноводе TE_{10}, хотя теоретически могут существовать и типы волны более высокого порядка. В случае, описанном в [51], отсутствие типов волны более высокого порядка тщательно проверено путем полного сканирования объема в жидкости, по результатам которого отклонение от теоретической структуры моды TE_{10} составило < ± 1 % – 2 %.



x, y, z — оси декартовой системы координат;
3δ — глубина жидкости (> трех глубин проникновения поля);
a — ширина поперечного сечения волновода;
b — высота поперечного сечения волновода;
P_f — мощность падающей волны;
P_r — отраженная мощность.

Рисунок В.1 — Экспериментальная установка, предназначенная для измерения чувствительности (коэффициента преобразования) с помощью вертикального волновода с прямоугольным сечением

Внутри жидкости поле распространяется почти так же, как поперечная электромагнитная волна, из-за низкой предельной частоты. Глубина жидкости (более трех глубин проникания поля) выбрана так, чтобы отражения на верхней поверхности жидкости были принебрежимо малыми. Мощность, поглощаемую жидкостью, оценивают измерением мощности прямой и отраженной волны внутри волновода:

$$SAR(z) = \frac{4(P_f - P_r)}{\rho ab\delta} e^{2z/\delta},$$

где z — продольная координата центров диполей в месте расположения зонда;
ab — площадь поперечного сечения волновода;
P_f — мощность прямой волны в волноводе;
P_r — мощность отраженной волны в заполнителе волновода и жидкости;
ρ — плотность жидкости;
δ — глубина проникания волны в жидкости, рассеивающей энергию;
e — основание натурального логарифма.

Примечание — В соответствии с требованиями настоящего стандарта значение ρ принято равным 1000 кг/м^3.

Данный метод обеспечивает наивысшую точность — суммарная стандартная неопределенность составляет менее ± 3,6 % в зависимости от частоты и среды. Вся градуировка сводится к измерениям мощности, которые могут быть проведены в рамках стандартной процедуры градуировки. Практическое ограничение полосы частот 800 — 2500 МГц, обусловленное размерами волновода, не является критическим в контексте проверки на соответствие, так как большая часть рабочих частот, используемых средствами мобильной связи, находится в пределах этой полосы частот. Для частот ниже 800 МГц самым лучшим средством минимизации погрешности градуировки является сравнительная калибровка с использованием температурных датчиков. При анализе погрешности градуировки с помощью аналитических полей должны быть учтены все параметры, перечисленные в таблице В.2.

Таблица В.2 — Анализ неопределенности измерений на основе распределения аналитического поля в волноводе (шаблон)

Источник неопределенности измерений	Значение неопределенности, ± %	Распределение вероятности	Делитель	c_i	Стандартная неопределенность u_i ± %	v_i или v_{eff}
Мощность падающей или прямой волны		R	√3	1		∞
Мощность отраженной волны		R	√3	1		∞
Проводимость жидкости		R	√3	1		∞
Диэлектрическая проницаемость жидкости		R	√3	1		∞
Однородность поля		R	√3	1		∞
Положение зонда		R	√3	1		∞
Линейность зонда		R	√3	1		∞
Суммарная стандартная неопределенность		RSS				

В.2.2 Процедура градуировки в один этап

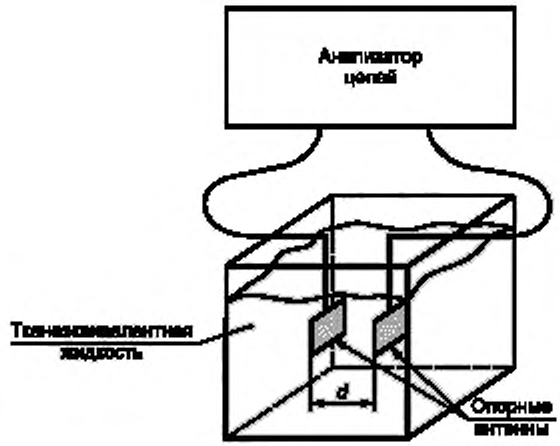
Процедура, предусмотренная В.2.1, может быть объединена в один этап посредством применения опорных антенн.

Общее значение напряженности поля E^2, В/м^2, рассчитывают по формуле

$$|E|^2 = \sum_{i=1}^{3} |E_i|^2 = \sum_{i=1}^{3} \frac{(V_i)}{K_i},$$

где K_i — абсолютная чувствительность дипольных датчиков в жидкости.

Опорные антенны — небольшие антенны, предназначенные для применения в соответствующей тканеэквивалентной жидкости. Примеры антенн, рассчитанных на полосы частот 900 и 1800 МГц, приведены в [48] и [49]. Для оценки коэффициента усиления антенны для главного лепестка, предназначенного для использования в целях градуировки зонда, требуется, как минимум, две одинаковые антенны.



d — расстояние между антеннами

Рисунок В.2 — Схема установки для измерения коэффициента усиления антенны

а) Коэффициент усиления опорных антенн измеряют в следующем порядке:

1) размещают антенны в жидкости так, чтобы оси их основных лепестков находились на одной линии, на четко определенном расстоянии d, где $d \geq 2D^2 / \lambda_{liquid}$, D — наибольший размер опорной антенны, а λ_{liquid} — длина волны в жидкости. Антенны должны быть удалены от каждой из стенок контейнера с жидкостью не менее чем на 10 см;

2) измеряют коэффициенты отражения ρ_1 и ρ_2 на входах каждой антенны;

3) измеряют коэффициент передачи S_{21} между двумя антеннами на одних и тех же портах;

4) рассчитывают коэффициент усиления G по формуле

$$G = |S_{21}(d)| e^{\alpha d} \left(\frac{4\pi d}{\lambda_{liquid}} \right) \frac{1}{\sqrt{\left(1 - |\rho_1|^2\right)\left(1 - |\rho_2|^2\right)}},$$

где коэффициент затухания выражен как

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \left(\varepsilon_r'^2 + \varepsilon_r''^2 \right)^{1/4} \cdot \sin\left[\frac{1}{2} \operatorname{arctg}\left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right) \right].$$

При расчете неопределенности измерений, вводимой коэффициентом усиления опорных антенн, должны быть учтены параметры, перечисленные в таблице В.3.

Таблица В.3 — Анализ неопределенности измерений, вводимой коэффициентом усиления опорной антенны

Источник неопределенности	Значение неопределенности, ± %	Распределение вероятности	Делитель	c_i	Стандартная неопределенность u_i ± %	v_i или v_{eff}
Мощность падающей волны		R	$\sqrt{3}$	1		∞
Коэффициенты отражения		R	$\sqrt{3}$	1		∞
Расстояние		R	$\sqrt{3}$	1		∞
Проводимость жидкости		R	$\sqrt{3}$	1		∞
Диэлектрическая проницаемость жидкости		R	$\sqrt{3}$	1		∞
Суммарная стандартная неопределенность		RSS				

б) Коэффициенты чувствительности зонда измеряют в следующей последовательности:

1) размещают одну антенну в тканеэквивалентную жидкость. Антенна должна быть удалена от каждой из стенок контейнера с жидкостью не менее чем на 10 см;

2) подключают источник питания к входу опорной антенны. Расчетное значение напряженности электрического поля E_{th} на расстоянии d от антенны может быть выражено как

$$E_{th} = \left[\left(\frac{P_{in}\left(1 - |\rho|^2\right) G e^{-2\alpha d}}{4\pi d^2} \right) \left(\frac{120\pi}{Re\sqrt{\varepsilon_r}} \right) \right]^{1/2},$$

где d — расстояние до антенны, где $d \geq 2D^2 / \lambda_{liquid}$;

G — коэффициент усиления антенны;

D — наибольший размер опорной антенны;

P_{in} — входная мощность;

ρ — коэффициент отражения антенны;

λ_{liquid} — длина волны в жидкости.

Для управления входной мощностью рекомендуется подключить двунаправленный ответвитель. Настраивают входную мощность так, чтобы $E_{th} \sim 30$ В/м.

3) помещают зонд в жидкость так, чтобы центр детекторов находился на расстоянии d от антенны.

4) ориентируют зонд так, чтобы направление диполя соответствовало поляризации опорной антенны.

5) измеряют напряжение на контакте зонда, соответствующем облучаемому диполю $V_{1,meas}$.

6) Коэффициент чувствительности K_1 этого диполя рассчитывают по формуле

$$K_1 = \frac{V_{1,meas}}{E_{b1}^2},$$

7) Повторяют шаги по перечислениям 4) — 6) для двух других диполей, чтобы рассчитать значения K_2 и K_3.

Зная коэффициенты чувствительности зонда, можно рассчитать коэффициент удельного поглощения *SAR* по формуле

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho}\left(\frac{V_1}{K_1} + \frac{V_2}{K_2} + \frac{V_3}{K_3}\right),$$

где ρ — плотность (1 000 кг/м^3).

При выполнении анализа неопределенности измерений, вводимой градуировкой с использованием опорной антенны, должны быть учтены параметры, перечисленные в соответствии с таблицей В.4.

Таблица В.4 — Анализ неопределенности измерений, вводимой градуировкой с использованием опорной антенны (шаблон)

Источник неопределенности	Значение неопределенности, ± %	Распределение вероятности	Делитель	c_i	Стандартная неопределенность u_i ± %	v_i или v_{eff}
Мощность падающей волны		*R*	√3	1		∞
Коэффициенты отражения		*R*	√3	1		∞
Коэффициент усиления антенны		*N*	1 или *k*	1		∞
Проводимость жидкости		*R*	√3	1		∞
Диэлектрическая проницаемость жидкости		*R*	√3	1		∞
Положение зонда		*R*	√3	1		∞
Суммарная стандартная неопределенность		*RSS*				

В.3 Изотропия

В.3.1 Осевая изотропия

Зонд подвергается воздействию опорной волны, падающей под прямым углом к главной оси зонда. Осевая изотропия определяется поворотом зонда вокруг своей главной оси на угол от 0° до 360° с шагом, меньшим или равным 15°.

В.3.2 Сферическая и полусферическая изотропия

Зонд подвергают воздействию опорной волны, падающей под разными углами. Полусферическую изотропию определяют поворотом зонда или поляризацией опорной волны. Угол падения волны должен варьироваться от 90° (осевой) до 0° (нормальный) с шагом, меньшим или равным 30°. При каждом угле падения волны зонд поворачивают на 360° с шагом, менее или равным 15°.

Полусферическая изотропия может измеряться тремя перечисленными ниже способами, дающими сходные результаты:

- плоский манекен с диполем сбоку;
- плоский манекен с диполем внизу;
- сферический манекен с диполем.

В.3.3 Измерение изотропии с помощью плоского манекена с диполем сбоку

Испытательная установка представляет собой короб из тонкого пластика, заполненный тканеэквивалентной жидкостью, которая находится под воздействием полуволнового резонансного диполя, работающего на заданной частоте. Сферическую изотропию зонда измеряют в следующем порядке:

a) устанавливают дипольную антенну на поворотном столе так, чтобы она была параллельна плоскому манекену (см. рисунок В.3). Максимальное расстояние между антенной и ближайшей стенкой контейнера с жидкостью $e = \lambda/10$;

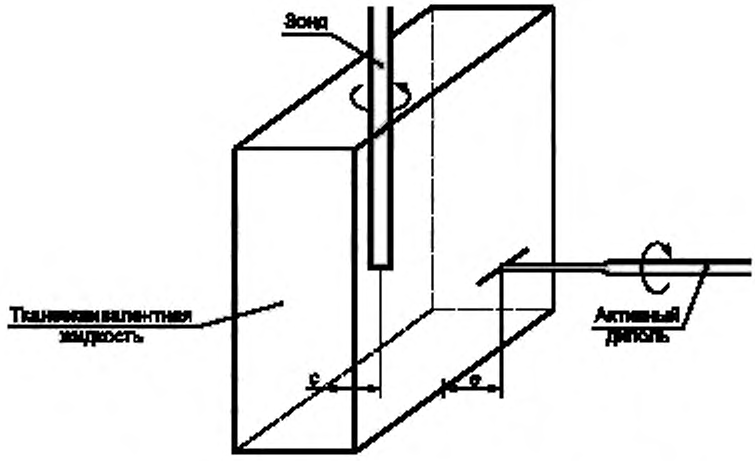
b) удерживают зонд в вертикальном положении, погружают его в жидкость так, чтобы центр трех датчиков зонда находился на одной линии с осью диполя;

c) горизонтальное положение зонда должно применяться (когда это возможно) при максимальной стоячей волне у задней стенки короба, на расстоянии d от границы манекена и жидкости, где электрическое поле частично однородно, а магнитное поле — минимально. Измерения могут также проводиться в неравномерном поле (максимальное значение электрического поля можно определить с помощью строчного сканирования в направлении X);

d) диполь поворачивают вокруг своей оси на угол от 0° до не менее 90° с шагом не более 30°;

e) при каждом шаге зонд поворачивают вокруг своей оси на угол от 0° до не менее 360° с шагом не более 15°, для чего используется устройство позиционирования зонда. При этом результаты измерений регистрируют для каждого шага;

f) отклонение значения сферической изотропии зонда выражают как максимальное отклонение коэффициента удельного поглощения энергии от среднего значения для каждого из положений зонда во время проведения измерений (± *xx dB*).



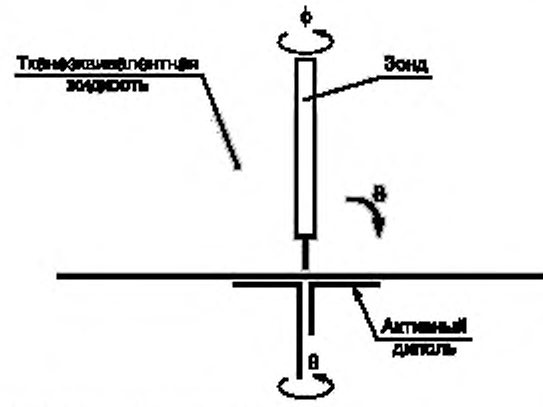
c — расстояние между зондом и задней стенкой, *e* — максимальное расстояние до ближайшей стенки контейнера с жидкостью

Примечание — Рекомендуется проводить измерение в области *c* с наименьшими значениями напряженности поля, обусловленными воздействием стоячей волны. Параметр *e* — расстояние между точкой запитывания на оси диполя и поверхностью жидкости.

Рисунок В.3 — Установка для оценки неопределенности измерений, связанной со сферической изотропией в тканеэквивалентной жидкости

В.3.4 Измерение изотропии с помощью плоского манекена с диполем снизу

Альтернативная установка для измерения изотропии показана на рисунке В.4. Полуволновой диполь устанавливают в держатель так, чтобы его плечи находились под плоским манекеном, заполненным тканеэквивалентной жидкостью, и были параллельны ему. Зонд должен находиться в точке, расположенной непосредственно над точкой запитывания диполя. Зонд вводят и устанавливают в той же области измерения над точкой запитывания диполя. Все повороты зонда выполняют и контролируют высокоточным устройством позиционирования зонда. Поворот зонда вокруг своей оси (угол поворота φ от 0° до 360°), в сочетании с поворотом диполя (угол поворота θ от 0° до 180°) и изменением угла наклона зонда (угол от 0° до 75°), обеспечивает трехмерное измерение значимой части полусферической диаграммы направленности в режиме приема.



ϑ — угол наклона оси зонда; θ — угол поворота оси диполя; φ — угол поворота оси зонда

Рисунок В.4 — Альтернативная установка для оценки неопределенности измерений, связанной со сферической изотропией в тканеэквивалентной жидкости

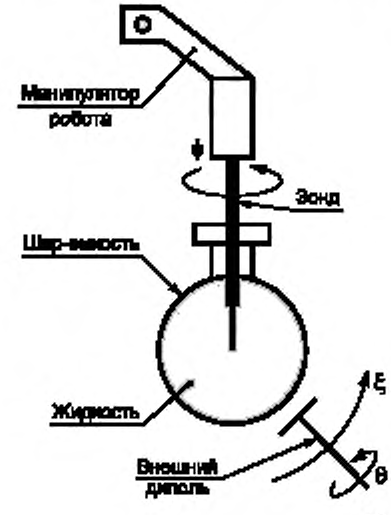
В.3.5 Измерение изотропии с помощью диполя и сферического манекена

Изотропия диаграммы направленности зонда в режиме приема во всех точках полусферы может быть измерена с помощью установки, состоящей из заполненного смесью сферического сосуда и внешнего диполя [11]. Полусферическая диаграмма направленности зонда в режиме приема может быть получена путем установки датчиков зонда в геометрическом центре сосуда и выполнения полного поворота зонда вокруг своей оси в нескольких разных условиях возбуждения (с разными углами падения волны и поляризацией), создаваемых внешней дипольной антенной. В данной испытательной установке не требуется, чтобы устройство позиционирования наклоняло и одновременно поворачивало зонд.

Испытательная установка, показанная на рисунке В.5, состоит из сферического сосуда, заполненного тканеэквивалентной жидкостью. Зонд находится в вертикальном положении, его датчики расположены в центре объема сферы. Возбуждение осуществляется внешним полуволновым диполем, настроенным на заданную рабочую частоту. Диполь удерживается в плоскости касания около ближайшей точки сферы.

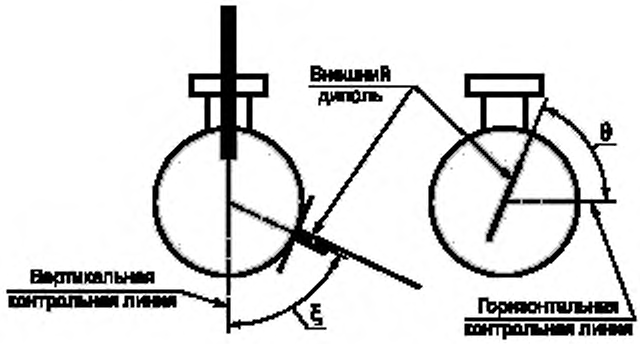
Примечание — Использование сосудов меньшего размера может быть предпочтительным, так как повышенная проводимость смеси или рабочая частота предполагают бóльшие потери при передаче волны на зонд. Более крупные сосуды отличаются более плоскими локальными поверхностями (бóльшим радиусом закругления), в результате чего на наконечник зонда воздействует падающая волна с более плоским локальным фронтом, которая уменьшает неопределенность, вводимую положением диполя.

Условные обозначения, применяемые для описания положения и поляризации антенны, показаны на рисунке В.6. Трехмерное измерение диаграммы направленности зонда в режиме приема в разных точках полусферы проводят поворотом зонда на 360° вокруг своей оси φ при выставлении внешнего диполя под углами $0° \le \xi \le 360°$. Все требуемые параметры поляризации падающей волны достигаются поворотом диполя вокруг своей оси на $0° \le \theta \le 180°$. При $\xi = 0°$ использование нескольких разных положений θ не требуется. Несмотря на то, что данная испытательная конфигурация позволяет проводить измерения в большом числе точек, для получения значащего результата достаточно шага 30° для ξ и шага 15° — для θ.



ξ — угол места оси диполя; θ — угол поворота диполя; φ — угол поворота оси зонда

Рисунок В.5 — Экспериментальная установка для оценки полусферической изотропии [11]



ξ — угол места оси диполя; θ — угол поворота диполя

Рисунок В.6 — Условное обозначение положения ξ и поляризации диполя θ [11]

При проведении предварительных измерений диоды-сенсоры должны функционировать в связанной квадратичной зависимостью области для данной мощности излучения диполя. В процессе измерений осуществляются повороты зонда на 360° для каждого положения и поляризации ξ, θ диполя. Мощность, излучаемую при каждом повороте, контролируют и регистрируют для каждого положения φ зонда, а полученные значения коэффициента удельного поглощения нормируют относительно номинального значения. Нет конкретных оснований полагать, что положения и параметры поляризации внешнего диполя, отличные от предусмотренных настоящей установкой, значительно ухудшат параметры изотропии, хотя исключить этого также нельзя. Как бы там ни было, программа испытания может быть расширена за счет включения в нее любых дополнительных испытаний, представляющих интерес, например испытаний в условиях поляризации, соответствующих ориентации датчиков в некоторых зондах.

Как и в случае с определением изотропии с использованием плоского манекена, за основу принимается прямоугольное распространение неопределенности измерений. Вместе с тем должная организация процесса испытаний позволяет значительно уменьшить неопределенность, как в случае, когда градуировку зонда осуществляют при определенной поляризации и направлении падающей волны, после чего те же условия поддерживают во время измерения коэффициента удельного поглощения энергии.

В.3.6 Измерение изотропии с использованием опорных антенн

Оценку изотропии зонда с помощью опорных антенн осуществляется в следующем порядке:

a) помещают одну из антенн в тканеэквивалентную жидкость так, чтобы она находилась на расстоянии не менее 10 см от стенок контейнера с жидкостью;

b) помещают зонд в жидкость так, чтобы центр датчиков находился на расстоянии d от антенны, где $d \geq 2D^2 / \lambda_{liquid}$, D — наибольший размер опорной антенны, а λ_{liquid} — длина волны в жидкости. Рекомендуется, чтобы в этой установке коэффициент удельного поглощения энергии был настроен на значение от 0,5 до 1 Вт/кг;

c) ориентируют зонд так, чтобы его главная ось была перпендикулярна к направлению излучения антенны (см. рисунок В.7);

d) поворачивают зонд вокруг его главной оси с 0° до 360° с шагом, меньшим или равным 15°. Регистрируют значения коэффициента удельного поглощения энергии. Осевую изотропию определяют отклонением коэффициента удельного поглощения энергии от среднеквадратического значения;

e) изменяют угол падения опорного поля, поворачивая опорную антенну или зонд вокруг своей оси (см. рисунок В.8) с 0° до 90° с шагом 15° или 30°;

f) для каждого угла падения поворачивают зонд вокруг главной оси с 0° до 360° с шагом, меньшим или равным 15°. Регистрируют значения коэффициента удельного поглощения энергии;

g) полусферическую изотропию определяют отклонением коэффициента удельного поглощения энергии от среднеквадратического значения во всем спектре неперпендикулярных углов воздействия на зонд.

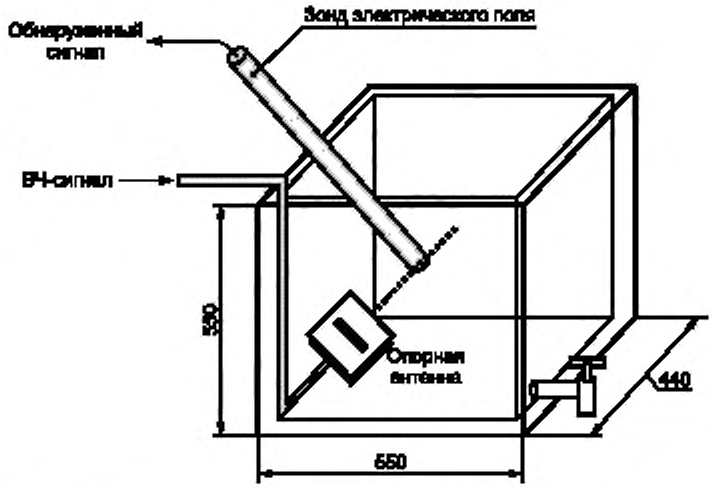
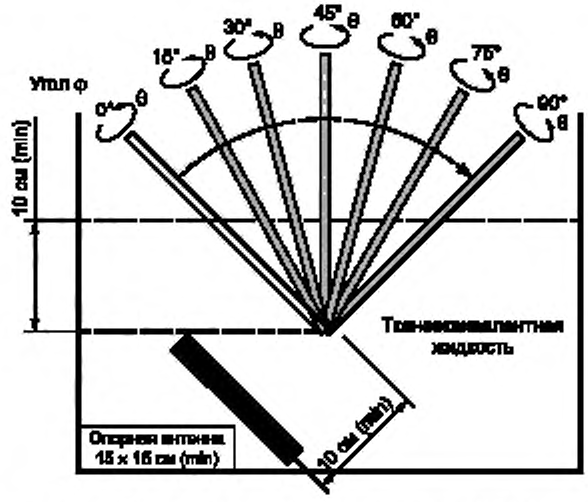


Рисунок В.7 — Измерение осевой изотропии с помощью опорной антенны



θ — угол поворота зонда вокруг своей оси; φ — угол наклона оси зонда

Рисунок В.8 — Измерение полусферической изотропии с помощью опорной антенны

В.4 Линейность

Поскольку нелинейная реакция зонда зависит только от характеристик диода, оценка функций линеаризации может проводиться в свободном пространстве или тканеэквивалентной жидкости. Для этого используют свип-сигнал, охватывающий требуемый диапазон измерения. Так как поля с высокими значениями напряженности могут генерироваться усилителями средней мощности, возможно использование небольших ТЕМ-камер, волноводов и опорных антенн.

Погрешность линейности определяется максимальным в пределах выбранного диапазона измерений отклонением измеряемой величины от ближайшей опорной линии, заданной для интервала 0,01 — 100 Вт/кг. Для проведения измерений может использоваться одна из установок, описанных в В.2 и представленных на рисунке D.1. Мощность увеличивают с шагом не более 1 дБ в диапазоне от 0,01 до 100 Вт/кг.

В.5 Нижний предел измерения

Нижний предел измерения связан с уровнем шума, отклонениями и асимметрией измерительной системы. Насыщение и другие эффекты нелинейности определяют верхний предел измерения. Для оценки нижнего и

верхнего пределов измерения могут применяться различные испытательные установки, например, описанные в разделе В.2 и показанные на рисунке D.1 и т.д. Нижний предел измерения определяют как уровень, начиная с которого ответный сигнал отклоняется от линейности более чем на 0,5 дБ (см. также В.4). В условиях реальной эксплуатации измерительной системы на нижнем пределе измерения может сказываться фоновая электромагнитная обстановка.

В.6 Граничные эффекты

В непосредственной близости к внутренней поверхности оболочки манекена чувствительность отклоняется от значения, установленного в нормальных условиях калибровки. Это отклонение оценивают распространением внутри плоского манекена поля, примерно соответствующего по своим характеристикам условиям воздействия плоской волны. Для измерения этого эффекта допускается использовать испытательную установку, подобную представленную на рисунке D.1, при этом граничный эффект определяют как разницу между измеренным значением коэффициента удельного поглощения энергии и ожидаемым экспоненциальным затуханием в жидкости, когда зонд сориентирован перпендикулярно к сопряжению. Этот эффект может быть в значительной степени скомпенсирован в соответствии с [51], [53]. Неопределенность, вводимую процедурой, оценивают в соответствии с 7.2.1.5.

В.7 Время реакции

Зонд подвергают воздействию опорной волны. Время реакции — это время, необходимое измерительному оборудованию для достижения 90 % конечного значения после изменения шага или выключения-включения источника. Выбранный шаг должен обеспечивать локальное значение коэффициента удельного поглощения энергии не менее 0,4 Вт/кг.

Приложение С
(обязательное)

Методы обработки результатов измерений и оценка неопределенности измерений

С.1 Схемы экстраполяции и интерполяции

С.1.1 Введение

Локальное значение коэффициента удельного поглощения энергии внутри манекена измеряют с помощью дипольных датчиков, находящихся в оболочке/корпусе зонда. При калибровке зонда и последующем измерении напряженности электрического поля за точку отсчета обычно принимают геометрический центр внутреннего блока диполей. Выбирая положение зонда для проведения измерений, необходимо учитывать, что диполи на несколько миллиметров удалены от его конца. Для того чтобы минимизировать неопределенности измерений, следует избегать контактов между наконечником зонда и поверхностью манекена, несмотря на то, что наибольшие локальные значения коэффициента удельного поглощения энергии обычно имеют место именно на поверхности манекена. Эти наибольшие локальные значения коэффициента удельного поглощения энергии важны для определения его предельного пространственно усредненного значения, поэтому их вычисляют экстраполяцией результатов измерений, полученных на нескольких расстояниях от оболочки. Для точного вычисления предельного пространственно усредненного значения коэффициента удельного поглощения энергии требуется очень высокое разрешение трехмерного массива считанных данных. Поскольку на проведение измерений отведен ограниченный период времени, что обусловлено ресурсом аккумуляторных батарей, осуществляется интерполяция данных, позволяющая получить массив с достаточным разрешением. Неопределенность, вводимую процедурами интерполяции, экстраполяции, интегрирования и усреднения, вычисляют, исходя из допущения об отсутствии неопределенности в определении точек измерения.

С.1.2 Схемы интерполяции

Интерполяция может осуществляться с помощью таких математических методов, как статистика [13], подбор эмпирических кривых базисных функций [33], анализ Фурье [12], анализ формы импульса [14] либо аппроксимация полиномиальных или сплайновых кривых [63]. Порядок применения этих методов описан в пособиях по вычислительной математике [55].

С.1.3 Схемы экстраполяции

Экстраполяция может осуществляться с помощью сплайн-функций, бигармонических сплайн-функций, элементарных волн, полиномиальных функций и рациональных функций. Порядок применения этих методов описан в пособиях по вычислительной математике. Поскольку точность экстраполяции зависит от расстояния и экстраполируемого распределения поля, неопределенность, обусловленная экстраполяцией, должна тщательно оцениваться.

С.2 Схема усреднения и поиск максимальных значений

С.2.1 Введение

Кубические объемы, рассчитываемые для усреднения локальных измеренных значений коэффициента удельного поглощения энергии после экстраполяции и интерполяции, должны находиться в непосредственной близости к поверхности манекена, чтобы в них попадали наибольшие локальные значения коэффициента удельного поглощения. В процессе обработки результатов измерений усредняющий куб поворачивают и смещают так, чтобы он совпал с поверхностью манекена.

С.2.2 Выбор куба

С.2.2.1 Метод трех точек

Грань куба может быть сориентирована на поверхности манекена так, чтобы три из вершин куба совпали с поверхностью. После этого может быть определено положение пяти остальных вершин куба. Пространство между кубом и поверхностью манекена включают в усредняющий объем, так как именно в нем может находиться точка с наибольшим локальным значением коэффициента удельного поглощения энергии. Для этого поверхности куба придают форму вогнутой внутренней поверхности манекена, после чего противоположную поверхность куба деформируют аналогичным образом так, чтобы куб вмещал 1 или 10 г усредняющей массы. Три установочные точки постепенно перемещаются по поверхности манекена, что дает возможность определить максимальное значение коэффициента удельного поглощения энергии в любом объеме массой 1 или 10 г. Метод трех точек показан на рисунке С.1.



Рисунок С.1— Метод трех точек

С.2.2.2 Метод тангенциальной грани

Другой метод заключается в выборе на поверхности манекена точки, которая принимается за точку, совпадающую с центром одной из граней куба. Затем определяют два вектора кривизны в точке касания, которые могут быть использованы для адаптации тангенциальной поверхности куба к поверхности манекена. Далее определяют местоположение остальных граней куба, после чего куб поворачивают вокруг вектора, перпендикулярного к поверхности манекена, чтобы измерить предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии. Как и в предыдущем методе, поверхности куба, находящейся в соприкосновении с оболочкой манекена, придают его форму — это необходимо для того, чтобы полностью захватить область наибольшего локального значения коэффициента удельного поглощения энергии. Противоположную грань куба выгибают или вдавливают так, чтобы куб вмещал 1 или 10 г усредняющей массы. Куб перемещают и поворачивают в разных точках поверхности манекена, что дает возможность определить максимальное значение коэффициента удельного поглощения энергии в любом кубическом объеме массой 1 или 10 г. Метод тангенциальной грани показан на рисунке С.2.



Рисунок С.2 — Метод тангенциальной грани

С.2.2.3 Метод усреднения

Основная цель заключается в получении усредняющей массы 1 или 10 г. Для этого точки измерения коэффициента удельного поглощения энергии могут добавляться слой за слоем, пока масса куба не превысит 1 или 10 г. После этого соответствующая поглощенная мощность может быть вычтена посредством линейной интерполяции. Метод усреднения показан на рисунке С.3.

Примечание — Обычно усредняющий куб описывают ступенчато — это обусловлено сеткой, на которую интерполируются точки измерения. Интерполяция может быть выполнена специально для куба, но этот метод требует много времени, так как для каждого усредняющего куба нужна своя процедура интерполяции.

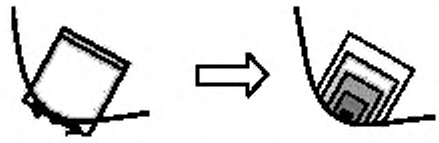


Рисунок С.3 — Метод усреднения

С.2.3 Экструзивный метод усреднения

Данный метод усреднения прост, так как параметры куба в значительной степени совпадают с параметрами измерительной сетки или, как минимум, сетки экстраполированных и интерполированных данных. Предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии находят путем перемещения усредняющего куба по выбранной области, например области, в которой локальные значения коэффициента удельного поглощения энергии превышает определенное пороговое значение. Экструзивный метод усреднения показан на рисунке С.4. Сканирование объема может осуществляться параллельно поверхности манекена. Это обеспечивает близость формы экструдированного объема к кубической и ее соответствие поверхности.



Рисунок С.4 — Экструзивный метод усреднения

С.2.4 Оценка неопределенности измерений, вводимой схемой усреднения и поиском максимального значения

Предельное локальное значение коэффициента удельного поглощения энергии отмечают на внутренней поверхности манекена, поэтому предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии должно иметь место в кубическом объеме тканеэквивалентной жидкости у поверхности манекена. Из этого следует, что сканирование с высоким разрешением следует проводить в областях предельных локальных значений коэффициента удельного поглощения энергии, выявленных сканированием внутренней поверхности манекена. Эта поверхность сканирования должна распространяться во всех направлениях на расстоянии, не менее чем в 1,5 раза превышающее линейный размер куба, применяемого для усреднения массы. Наибольшие значения коэффициента удельного поглощения энергии вычисляют, исходя из локальных градиентов коэффициента удельного поглощения в усредняющем кубе, с помощью компьютеризированных алгоритмов. Неопределенность, вводимая схемой усреднения и поиском максимальных значений, учитывается методами вычисления, в соответствии с 7.2.4, поскольку она служит исходным критерием не только для схем интерполяции и экстраполяции, но и для схем усреднения и поиска максимальных значений.

С.3 Примерные параметры процедур сканирования и оценки данных

С.3.1 Введение

В настоящем разделе описаны примерные параметры процедур сканирования значений удельного поглощения энергии и оценки данных. Приведенное ниже описание используется в качестве примера; возможны и другие способы организации процедур сканирования и оценки данных.

С.3.2 Поиск максимальных значений с помощью *сканирования по площади*

Для ручных устройств, работающих на частоте свыше 300 МГц и испытываемых с помощью однородной модели головы, распределение значений коэффициента удельного поглощения энергии измеряют посредством двухмерной грубой сетки на фиксированном удалении от поверхности оболочки манекена, которое должно быть 8 мм. Область сканирования должна охватывать все зоны, подверженные воздействию и попадающие в проекцию испытываемого устройства. Для того, чтобы поддерживать фиксированное (менее 8 мм) удаление от поверхности постоянным с неопределенностью ±1 мм, что предусмотрено процедурой измерения, точная форма и размеры внутренней поверхности манекена должны быть известны или (что предпочтительнее) установлены во время измерения коэффициента удельного поглощения энергии с помощью механического или оптического детектора поверхности, соответственно требованиям к позиционированию зонда. Для данного метода измерения предусмотрено максимальное значение интервала между точками сетки: установлено, что сетки размером 20 × 20 мм обычно достаточно для достижения необходимой точности, если место нахождения точки с максимальным значением коэффициента удельного поглощения энергии [57] определяется с помощью двух расположенных уступами одномерных кубических сплайнов [55].

С.3.3 Сканирование с высоким разрешением

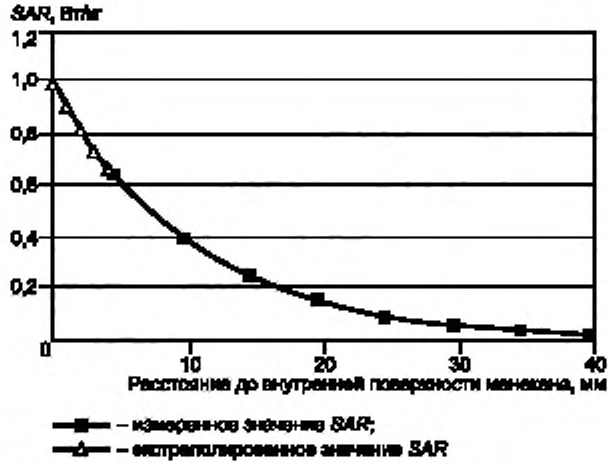
Максимальное локальное значение коэффициента удельного поглощения энергии определяется на интерполированной сетке с шагом от 1 до 2 мм посредством процедуры *сканирования с высоким разрешением*. Может быть выбран объем *сканирования с высоким разрешением*, составляющий 32 × 32 × 30 мм и состоящий из 5 × 5 × 7 точек с центром в точке предельного значения коэффициента удельного поглощения энергии, определенной с помощью *сканирования по площади*. Хотя для достижения требуемой точности экстраполяции в направлениях, параллельных поверхности, вполне достаточно сканирования с разрешением 8 мм, в направлении, перпендикулярном к поверхности, разрешение должно быть 5 мм.

С.3.4 Экстраполяция

Так как реальное местонахождение точки измерения соответствует геометрическому центру датчиков диполей, который в свою очередь смещен относительно наконечника зонда, значения коэффициента удельного поглощения энергии, требуемые для определения приведенного к 1 или 10 г ткани значения коэффициента удельного поглощения энергии между поверхностью манекена и ближайшими измеряемыми точками, определяют экстраполяцией. Хотя базовое приближение экспонентой может не подходить для экстраполяции многих типовых вариантов распределения коэффициента удельного поглощения энергии, имеющих место при испытании ручных абонентских устройств, обработка данных путем полиномиального подбора методом наименьших квадратов четвертого порядка точности обычно дает удовлетворительные результаты. Треугольные точки, представленные на рисунке С.5, соответствуют экстраполированным с шагом 1 мм значениям коэффициента удельного поглощения энергии для недоступных измерению точек, находящихся в непосредственной близости к поверхности манекена.

С.3.5 Интерполяция

Измеренные и экстраполированные значения коэффициента удельного поглощения в объеме *сканирования с высоким разрешением* интерполируют на 1-миллиметровую сетку для определения предельного пространственно усредненного значения коэффициента удельного поглощения энергии, приведенного к 1 или 10 г ткани, например, с использованием трех расположенных уступами одномерных кубических сплайнов [55].



Примечание — Треугольниками обозначены значения, экстраполированные с шагом 1 мм.

Рисунок С.5 — Экстраполяция значений коэффициента удельного поглощения энергии на внутреннюю поверхность манекена с обработкой измеренных значений (квадраты) посредством полиномиального подбора методом наименьших квадратов

С.3.6 Интегрирование

Одним из способов интегрирования коэффициента удельного поглощения энергии для куба массой 1 или 10 г является применение базового трапецеидального алгоритма. Максимальное предельное пространственно усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии может быть рассчитано путем численного интегрирования с включением всех кубов массой 1 или 10 г в пределах объема *сканирования с высокой точностью* либо путем применения более сложных алгоритмов поиска. Если поверхность куба массой 1 или 10 г касается границы объема *сканирования с высокой точностью*, испытания, проводимые путем *сканирования с высокой точностью*, должны быть повторены с новым центром, расположенным в точке максимального значения коэффициента удельного поглощения энергии, выявленной при предыдущем измерении коэффициента предельного пространственного значения для 1 или 10 г ткани.

Приложение D
(обязательное)

Валидация системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии

D.1 Введение

В настоящем приложении приведены процедуры двух уровней валидации системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии:

a) *проверка системы;*

b) *валидация системы.*

Эти два уровня проверки преследуют следующие цели и применяются в следующих случаях:

Проверка системы — это быстрый и надежный способ контроля системы, который может применяться ежедневно или непосредственно перед каждым измерением коэффициента удельного поглощения энергии. Цель *проверки системы* — убедиться в том, что все элементы испытательной установки остаются в пределах лабораторной настройки, включая эффекты ухода параметров. Для проверки системы требуется плоский манекен и стандартный источник, например полуволновой диполь.

Валидация системы — это процедура оценки всей системы на предмет ее пригодности к применению. Испытательная установка состоит из плоского манекена и стандартного диполя (см. приложение G). В связи с этим процедура *валидации системы* не учитывает неопределенности измерений, обусловленной использованием антропоморфических манекенов и отклонениями в позиционировании устройства. Эта процедура выполняется ежегодно (например, после калибровки зонда) перед проведением измерений, связанных с межлабораторными сравнительными испытаниями (см. приложение E), и каждый раз при внесении изменений в систему, например, при переходе на новую версию программного обеспечения, другую считывающую электронику или другие типы зондов.

Примечание — Межлабораторные сравнительные испытания проводят с целью проверки подготовленности испытательных лабораторий и предполагают использование опорного испытуемого устройства (см. E.3) и стандартного антропоморфического манекена. Метод проверки подготовленности испытательных лабораторий учитывает разброс данных, связанных с применением человекоподобных манекенов и позиционированием устройств. Цель метода — сравнение точности и правильности работы испытательных лабораторий.

D.2 Проверка системы

D.2.1 Цель

Цель *проверки системы* — убедиться в том, что система функционирует в соответствии с заявленными характеристиками. *Проверка системы* представляет собой проверку ее стабильности как гарантии ее правильной работы во время проведения испытаний на соответствие. *Проверка системы* не представляет собой проверку системы на соответствие другим стандартам. *Проверка системы* позволяет выявить кратковременный уход параметров и погрешности системы, такие как:

a) изменение параметров жидкости (например, в результате испарения воды или перепадов температуры);

b) отказы элементов системы;

c) уход параметров элементов системы;

d) ошибки оператора в настройке системного программного обеспечения;

e) воздействие на систему негативных факторов, таких как радиочастотные помехи.

Проверка системы представляет собой полноценное измерение среднего коэффициента удельного поглощения энергии, приведенного к 1 или 10 г ткани, в упрощенной испытательной установке с использованием опорного источника (см. D.2.3). При *проверке системы* применяют те же измерительные приборы и процедуры, что и при проведении испытаний на соответствие. *Проверку системы* проводят с использованием той же жидкости, что и испытания на соответствие, на заданной фиксированной частоте, находящейся в пределах ± 10 % середины диапазона частот, в котором проводятся испытания на соответствие. *Проверку системы* проводят перед испытаниями на соответствие, при этом полученные результаты всегда должны быть в пределах ± 10 % заданного значения, предусмотренного для используемых при испытании частоты и источника. Заданные значения — это средние значения коэффициента удельного поглощения энергии для 1 или 10 г ткани, измеренные с помощью любой системы, прошедшей процедуру *валидации системы* с применением установки для *проверки системы*, показанной на рисунке D.1. Эти заданные значения определяют с помощью стандартного управляемого источника.

D.2.2 Конфигурация манекена

При проведении *проверки системы* и *валидации системы* используют плоский манекен, наполненный рекомендуемой тканеэквивалентной жидкостью (см. раздел 7). Минимальные поперечные размеры (ширина и длина) должны обеспечивать измерение коэффициента удельного поглощения энергии с максимальным отклонением не более 1 %. Минимальные размеры нижней поверхности плоского манекена определяют эллипсом с большой осью *a*, малой осью *b* и толщиной оболочки *d* в соответствии со следующими критериями:

$a \geq 0{,}6\ \lambda$; $b \geq 0{,}4\ \lambda$; 6,0 мм $\leq d \leq$ 6,3 мм при $f <$ 800 МГц,

$a \geq$ 225 мм; $b \geq$ 150 мм; d = 2 мм при $f \geq$ 800 МГц.

Длина волны λ — это длина волны в свободном пространстве, а толщина d должна быть равномерой с учетом неопределенности измерений ± 0,2 мм. Точка возбуждения дипольных источников должна находиться в центре эллипса, а плечи диполя — быть на одной линии с большой осью (см. характеристики диполя в приложении G),а также [5]. Относительная диэлектрическая проницаемость пластика, из которой изготовлена оболочка манекена, должна быть менее 5, а тангенс угла диэлектрических потерь — менее 0,05. Пластмасса должна быть прочной и не вступать в реакцию с химическими веществами, входящими в состав тканеэквивалентной жидкости. При заполнении манекена жидкостью не менее чем на 15 см прогиб его внутренней поверхности на границе с жидкостью, в области, непосредственно расположенной над источником (например диполем), должен составлять менее 1 % длины волны в свободном пространстве для полосы частот от 800 до 3000 МГц, и менее 0,5 % длины волны в свободном пространстве для — частот ниже 800 МГц.

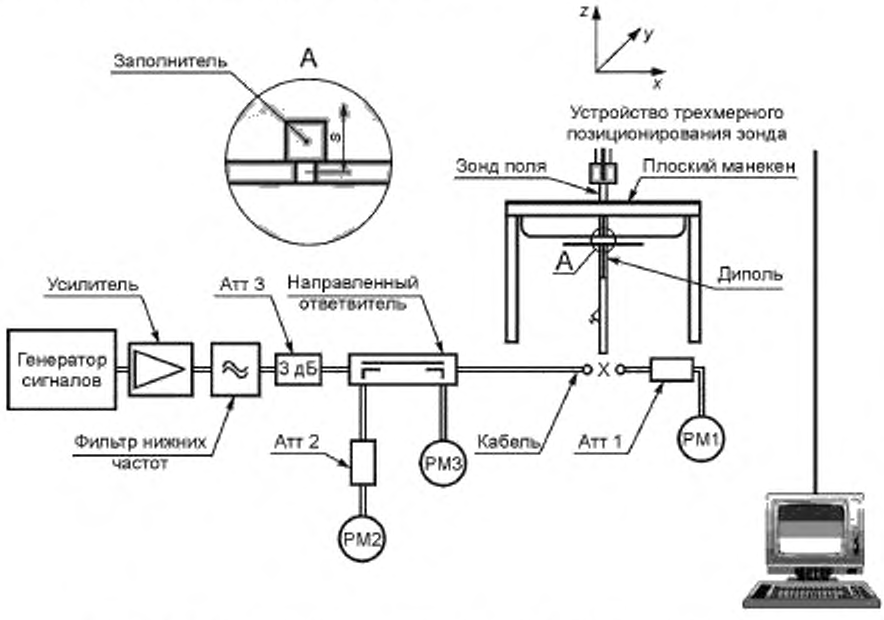
D.2.3 Опорный источник

Манекен подвергают воздействию излучения от опорного источника, предусмотренного для соответствующей частоты (например, полуволнового диполя или опорной антенны). Опорные диполи, предназначенные для *валидации системы* (см. приложение G), могут применяться и для *проверки системы*, хотя это не является обязательным требованием. Выбранный опорный источник должен обеспечивать стабильную повторяемость позиционирования, механическую устойчивость и согласование полных сопротивлений. В последующих инструкциях по позиционированию за опорный источник в качестве примера принят полуволновой диполь.

Полуволновой диполь устанавливают под днищем манекена и центруют, чтобы его ось была параллельна самой длинной стороне манекена. Расстояние между внутренней поверхностью заполненного жидкостью манекена и центром диполя s (см. рисунок D.1 и приложение H, таблица H.1) указывают для каждой заданной частоты. Для поддержания правильного расстояния между верхней поверхностью диполя и нижней поверхностью манекена применяется специальная распорка с низким уровнем потерь (тангенс угла потерь < 0,5) и низкой диэлектрической постоянной (относительная диэлектрическая проницаемость < 5). Для минимизации неопределенности измерений мощности диполь должен иметь на резонансной частоте (измеренной в установке) коэффициент отражения менее – 20 дБ. Допустимое отклонение расстояния s должно быть ± 0,2 мм.

D.2.4 Измерение входной мощности опорного источника

Отклонение значения мощности на входе источника должно быть минимальным. Для этого при *проверке системы* в состав испытательной установки должны входить направленные ответвители и измерители мощности (ваттметры). Рекомендуемая конфигурация испытательной установки показана на рисунке D.1 (за опорный источник в ней в качестве примера принят полуволновой диполь).



PM1, PM2, PM3 — измерители мощности; Атт1, Атт 2, Атт 3 — аттенюаторы

Рисунок D.1 — Установка для *проверки системы*

Вначале измеритель мощности РМ1 (включая аттенюатор Атт 1) подсоединяют к кабелю для измерения мощности в прямом направлении в точке разъема диполя (X). Генератор сигналов настраивают так, чтобы на разъеме диполя (с учетом затухания на Атт 1) была создана требуемая мощность в прямом направлении, которую измеряют измерителем мощности РМ1. После подсоединения кабеля к диполю генератор сигналов перенастраивают так, чтобы аналогичные показания были зафиксированы измерителем мощности РМ2. Если генератор сигналов не обеспечивает изменения значений с шагом 0,01 дБ, разницу, отличающую показание РМ2, учитывают при расчетах. Соответствие параметров диполя проверяют анализатором цепей (например, в период между ежегодными проверками рабочих параметров) с целью удостовериться, что отраженная мощность не менее чем на 20 дБ ниже мощности в прямом направлении.

К элементам системы и измерительному оборудованию предъявляют следующие требования:

a) генератор сигналов и усилитель должны работать стабильно (после прогрева). Мощность в прямом направлении на входе диполя должна быть достаточной для того, чтобы создаваемое значение коэффициента удельного поглощения энергии превышало нижний предел измерения зонда (см. B.5). Если генератор сигналов обеспечивает мощность 15 дБм и более, усилитель не требуется. Некоторые усилители высокой мощности не рассчитаны на эксплуатацию на уровне значительно ниже их максимальной выходной мощности, например, при выходной мощности 250 мВт 100-ваттный усилитель может создавать значительный шум. Для защиты входа усилителя между генератором сигналов и усилителем рекомендуется использовать аттенюатор;

b) низкочастотный фильтр, установленный после усилителя, уменьшает эффект гармонических колебаний и шум от усилителя. Большинству усилителей в нормальном режиме работы фильтр не требуется;

c) аттенюатор, установленный после усилителя, улучшает согласование источника и повышает точность датчика мощности (см. руководство по эксплуатации измерителя мощности);

d) направленный ответвитель (с рекомендуемым коэффициентом связи 20 дБ) предназначен для контроля мощности в прямом направлении и корректировки мощности на выходе генератора сигналов для поддержания мощности в прямом направлении на постоянном уровне. Достаточно ответвителя среднего качества, так как обе нагрузки (на диполе и головке) хорошо согласованы;

e) измерители мощности РМ2 и РМ3 должны иметь малый уход параметров и разрешающую способность 0,01 дБм, но даже в противном случае их точность незначительно сказывается на мощности (градуировка абсолютным методом не требуется);

f) измеритель мощности РМ1 и аттенюатор Атт 1 должны быть высокого качества. Они подлежат градуировке, желательно, в сочетании друг с другом. Аттенюатор (затухание 10 дБ) повышает точность измерения мощности (некоторые головки высокой мощности поставляются в комплекте со встроенным отградуированным аттенюатором). Должен быть известен точный тангенс угла потерь аттенюатора на заданной частоте; во многих аттенюаторах имеет место отклонение до 0,2 дБ от указанного значения;

g) при испытании РМ1 уровень мощности должен быть таким же, как и при проведении реальных измерений с тем, чтобы исключить неопределенность измерений, обусловленную нелинейностью и переключением диапазона измерения мощности в измерителях мощности РМ2 и РМ3. При изменении уровня мощности процедура настройки уровня мощности осуществляется повторно;

h) диполь подсоединяется к кабелю непосредственно в точке *X*. Если в измерителе мощности применен разъем, отличный от типа разъема диполя, следует использовать переходники высокого качества.

D.2.5 Процедура *проверки системы*

Проверка системы представляет собой полноценное измерение коэффициента удельного поглощения энергии, приведенного к 1 и/или 10 г ткани. Усредненное значение коэффициента удельного поглощения энергии для 1 и/или 10 г ткани нормируют к заданной входной мощности стандартного источника и сравнивают с ранее зарегистрированным заданным значением для 1 и/или 10 г ткани, соответствующим заданной частоте и параметрам опорного источника. При каждой *проверке системы* определяют допустимое отклонение, которое должно составлять ± 10 % заданных значений, зарегистрированных при предшествующей *проверке системы*.

D.3 Валидация системы

D.3.1 Цель

Процедура *валидации системы* имеет целью проверку системы с использованием контрольных значений коэффициента удельного поглощения энергии, а также качества функционирования зонда, считывающей электроники и программного обеспечения. Для ее проведения используется плоский манекен и стандартный диполь. В связи с этим процедура валидации не учитывает разброса данных, связанного с применением антропоморфических манекенов, и неопределенности измерений, обусловленной отклонениями в позиционировании устройства.

Валидацию системы проводят ежегодно, а также при вводе в эксплуатацию новой системы и при внесении любых изменений в действующую систему, таких как переход на новую версию программного обеспечения, другую считывающую электронику или другие типы зондов. Для *валидации системы* применяют отградуированные зонды.

Цель настоящего раздела — описание методики *валидации системы*, предназначенной для измерения коэффициента удельного поглощения энергии. Поскольку оборудование для измерения коэффициента удельного поглощения энергии, методы градуировки, манекены и тканеэквивалентные жидкости, применяемые разными лабораториями, существенно различаются, требуется методика валидации, гарантирующая единообразие результатов в пределах разумной неопределенности измерений. Внесенные контрольные значения коэффициента удельного поглощения энергии, используемые при *валидации системы*, приведены в таблице D.1.

Примечание — Процедура *валидации системы* не является альтернативой градуировке зонда или вычислению неопределенности измерений, как это предусмотрено разделом 7. Градуировка зонда и считывающей электроники осуществляется регулярно в соответствии с процедурами, описанными в приложении B. Полусферическая изотропия зонда не учитывается протоколом *валидации системы*.

D.3.2 Конфигурация манекена

Плоский манекен, описанный в разделе, посвященном *проверке системы* (см. рисунок D.1), применяется также для *валидации системы*. *Валидация системы* осуществляется с использованием тканеэквивалентных жидкостей, диэлектрические свойства которых перечислены в таблице 1.

D.3.3 Опорный диполь

Манекен подвергают воздействию облучения от указанного в приложении G опорного диполя, рассчитанного на соответствующую частоту. Опорный диполь устанавливают под днищем манекена и центруют так, чтобы его ось была параллельна самой длинной стороне манекена. Для поддержания правильного расстояния между верхней поверхностью опорного диполя и нижней поверхностью манекена может использоваться распорка с низким уровнем потерь и низкой диэлектрической проницаемостью. Расстояние между нижней поверхностью заполненного жидкостью манекена и центром опорного диполя (обозначается символом «*s*») указывается с точностью до 0,2 мм для каждой заданной частоты. Для уменьшения неопределенности измерений мощности опорный диполь должен иметь на резонансной частоте коэффициент потерь на отражение не более минус 20 дБ (измеряется в установке).

Для опорных диполей, описанных в приложении G, расстояние *s* равно:

a) $s = (15 \pm 0{,}2)$ мм — для $300 \le f \le 1000$ МГц;

b) $s = (10 \pm 0{,}2)$ мм — для $1000 \text{ МГц} < f \le 3000$ МГц .

Вибраторы опорного диполя должны быть параллельны плоской поверхности манекена с неопределенностью $\pm 2°$ или менее (см. рисунок D.1).

D.3.4 Измерение входной мощности опорного диполя

Процедура измерения входного напряжения, применяемая при *проверке системы* (см. D.2.4), применима также при *валидации системы*.

D.3.5 Процедура *валидации системы*

Валидация системы имеет целью проверку точности показаний всей измерительной системы, а также рабочих параметров ее программного обеспечения. При ее проведении не учитывают неопределенность измерений, вводимую положением испытуемого устройства и формой головного манекена. Процедура *валидации системы* состоит из шести шагов по перечислениям a) — e). Шаг a) — самый важный этап процедуры *валидации системы* — он выполняется каждый раз. Шаги b) — e) (рекомендуемые) дают возможность быстро и легко проверить рабочие параметры зонда, считывающей электроники и программного обеспечения. Дополнительные испытания, предусмотренные этими шагами, проводят каждый раз, когда в элементы системы вносятся какие-либо изменения (например, при переходе на новую версию программного обеспечения, новую считывающую электронику или новый тип зонда), но необходимо, чтобы каждая лаборатория (например, калибровочная или испытательная лаборатория, проводила их для одной и той же версии системы. *Валидация системы* осуществляется в следующем порядке:

шаг a) — измерение коэффициента удельного поглощения энергии. Проводят измерение среднего значения коэффициента удельного поглощения энергии для 1 и/или 10 г ткани. Входную мощность опорного диполя настраивают так, чтобы в результате для 1 и/или 10 г ткани было получено среднее значение коэффициента удельного поглощения энергии, укладывающееся в диапазон от 0,4 до 10 Вт/кг. Значение коэффициента удельного поглощения энергии, приведенное к 1 и/или 10 г ткани, измеряют на указанных в таблице D.1 частотах в пределах полосы частот, используемой при проведении испытаний на соответствие. Полученные результаты нормируют к входной мощности в прямом направлении 1 Вт и сравнивают с контрольным значением коэффициента удельного поглощения энергии для опорного диполя и плоского манекена, указанным в колонках 2 и 3 таблицы D.1. Отклонения от контрольных значений, приведенных в таблице D.1, должны быть меньше неопределенности измерений, установленной для системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии производителем или разработчиком, т.е. они должны быть в пределах расширенной неопределенности измерений, предусмотренной для *валидации системы* согласно процедурам, описанным в таблице 3 (см. таблицу 3, примечание 10):

шаг b) — процедура экстраполяции. Локальные значения коэффициента удельного поглощения энергии измеряют вдоль вертикальной оси непосредственно над точкой возбуждения опорного диполя с применением того же интервала между точками, что и при измерении предельного пространственно усредненного значения коэффициента удельного поглощения энергии. Эти измерения проводят повторно вдоль другой вертикальной оси, сдвинутой на 2 см по горизонтали (направление *y* — см. рисунок D.1) от точки возбуждения опорного диполя. Значения коэффициента удельного поглощения энергии на поверхности манекена экстраполируют и сравнивают со значениями, приведенными в колонках 4 и 5 таблицы D.1. Отклонение от контрольных значений, приведенных в таблице D.1, должно быть меньше неопределенности измерений, установленной для системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии изготовителем или разработчиком, т.е. они должны быть в пределах расширенной неопределенности измерений, предусмотренной для *валидации системы* согласно процедурам, описанным в таблице 3 (см. таблицу 3, примечание 10);

шаг c) — линейность зонда. Измерения, предусмотренные шагом a), повторяются с другими значениями входной мощности стандартного диполя. Для каждой частоты уровни мощности выбирают так, чтобы средние значения коэффициента удельного поглощения энергии, приведенные к 1 и/или 10 г ткани, составляли приблизительно 10 или 8, 2 или 1,6 и 0,4 Вт/кг. Измеренные значения коэффициента удельного поглощения энергии нормируют к входной мощности в прямом направлении 1 Вт и сравнивают с нормированными к 1 Вт значениями, полученными при выполнении шага a). Разница между этими значениями должна быть меньше неопределенности измерений, установленной для системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии изготовителем или разработчиком, т.е. она должна быть в пределах расширенной неопределенности, предусмотренной для линейности согласно процедурам, описанным в таблице 3 и разделе 7.2.1.3;

шаг d) — реакция на модуляцию. Измерения, предусмотренные шагом a), повторяют с импульсно модулированными сигналами при коэффициенте заполнения 0,1 и частоте повторения импульсов 10 Гц. Мощность настраивают так, чтобы получить среднее значение коэффициента удельного поглощения энергии, приведенное к 1 и/или 10 г ткани, составляющее приблизительно 8 Вт/кг для немодулированного сигнала, или предельное значение мощности, составляющее приблизительно 80 Вт/кг. Измеренные значения коэффициента удельного поглощения энергии нормируют к входной мощности в прямом направлении 1 Вт и коэффициенту заполнения 1, и сравнивают с нормированными к 1 Вт значениями, полученными при выполнении шага a). Разница между этими значениями должна быть меньше неопределенности измерений, установленной для системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии изготовителем или разработчиком, т.е. она должны быть в пределах расширенной неопределенности, предусмотренной для *валидации системы* согласно процедурам, описанным в таблице 3 (см. таблицу 3, примечание 10);

шаг e) — системное отклонение. Измерения, предусмотренные шагом a), повторяют с мощностью в прямом направлении на входе опорного диполя, настроенной таким образом, чтобы среднее значение коэффициента удельного поглощения энергии, приведенное к 1 и/или 10 г ткани, было примерно равно 0,05 Вт/кг. Измеренные значения коэффициента удельного поглощения энергии нормируют к входной мощности в прямом направлении 1 Вт и сравниваются с нормированными к 1 Вт значениями, полученными при выполнении шага a). Разница между этими значениями должна быть меньше неопределенности измерений, установленной для системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии изготовителем или разработчиком, т.е. она должна быть в пределах расширенной неопределенности, предусмотренной для *валидации системы* согласно процедурам, описанным в таблице 3 (см. таблицу 3, примечание 10);

шаг f) — осевая изотропия зонда. Зонд устанавливают непосредственно над центром опорного диполя на расстоянии 5 мм от внутренней поверхности манекена. Зонд (или опорный диполь) поворачивают вокруг своей оси не менее чем на 180° с шагом не более 15°. При этом регистрируются максимальные и минимальные значения коэффициента удельного поглощения энергии. Разница между этими значениями должна быть меньше неопределенности измерений, установленной для системы измерения коэффициента удельного поглощения энергии изготовителем или разработчиком, т.е. она должна быть в пределах расширенной неопределенности, предусмотренной для изотропии, согласно процедурам, описанным в таблице 3 и разделе 7.2.1.2.

D.3.6 Опорные значения коэффициента удельного поглощения энергии

При *валидации системы* опорный диполь, рассчитанный на частоту f_i (согласно описанию, приведенному в приложении G), должен обеспечивать контрольные значения предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии, представленные в колонках 2 и 3 таблицы D.1, с учетом неопределенности измерений, предусмотренной для *валидации системы* (см. таблицу 3, примечание 10). Колонки 4 и 5 таблицы D.1 предназначены для проверки системных процедур экстраполяции, описанных в разделе D.3.5. Контрольные значения коэффициента удельного поглощения энергии рассчитывают по методу конечно-разностных вычислений во временной области с использованием параметров плоского манекена, приведенных в таблице H.1. Значения для полосы частот от 800 до 3000 МГц проверены экспериментально с использованием полиномиальной экстраполяции 4-го порядка. Экспериментально проверенные контрольные значения коэффициента удельного поглощения энергии для частот 300 и 450 МГц будут включены в следующее издание настоящего стандарта. Параметры свободного от потерь манекена, использованного при моделировании (размеры, толщина оболочки и диэлектрическая проницаемость), а также расстояние *s* между опорным диполем и жидкостью указаны в таблице H.1. Диэлектрические свойства жидкости указаны в таблице 1, а размеры опорных диполей — в таблице G.1.

Таблица D.1 — Опорные значения коэффициента удельного поглощения энергии для опорного диполя и плоского манекена

Частота МГц	Коэффициент удельного поглощения энергии, приведенный к 1 г ткани, Вт/кг	Коэффициент удельного поглощения энергии, приведенный к 10 г ткани, Вт/кг	Локальный коэффициент удельного поглощения энергии на поверхности (над точкой возбуждения), Вт/кг	Локальный коэффициент удельного поглощения энергии на поверхности (смещение от точки возбуждения y = 2 см), Вт/кг
1	2	3	4	5
300	3,0	2,0	4,4	2,1
450	4,9	3,3	7,2	3,2
835	9,5	6,2	14,1	4,9
900	10,8	6,9	16,4	5,4
1 450	29,0	16,0	50,2	6,5
1 800	38,1	19,8	69,5	6,8
1 900	39,7	20,5	72,1	6,6
1 950	40,5	20,9	72,7	6,6
2 000	41,1	21,1	74,6	6,5
2 450	52,4	24,0	104,2	7,7
3 000	63,8	25,7	140,2	9,5

Примечания

1 Все значения нормированы относительно проходящей мощности 1 Вт.

2 Должны быть использованы размеры манекена, указанные в D.2.2.

Приложение Е
(справочное)

Межлабораторные сравнительные испытания

Е.1 Цель

Цель межлабораторных сравнительных испытаний — проверка различных систем измерения коэффициента удельного поглощения энергии путем сравнения результатов измерений, полученных несколькими разными лабораториями. Общая концепция предполагает использование опорных ручных абонентских устройств и антропоморфического манекена стандарта *SAM*, наполненного тканеэквивалентной жидкостью с диэлектрическими параметрами, указанными в 5.2. При этом применяются методики измерения коэффициента удельного поглощения энергии, описанные в разделе 6.

Сравнивают результаты измерений, проведенных разными лабораториями. Помимо них сравнению подлежат результаты анализа неопределенности измерений. Межлабораторные сравнительные испытания считают успешными, если различия и несовпадения результатов измерений могут быть отнесены на счет различий в неопределенности измерений. В противном случае все источники неопределенности измерений подлежат анализу в соответствии с требованиями раздела 7. Следует также учитывать и другие возможные источники неопределенности, отличные от указанных в разделе 7.

Примечание — Общие рекомендации по проведению межлабораторных сравнительных испытаний могут быть проиллюстрированы примерами, приведенными в [9], [24].

Е.2 Конфигурация манекена

Антропоморфический манекен описан в разделе 5 и приложении А. Манекен должен иметь оболочку, изготовленную из прочного материала с низкой (менее 5) диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла потерь менее 0,05. Следует избегать наличия металлических элементов на расстоянии менее 50 см от оболочки манекена. Манекен подвергают воздействию излучения опорного ручного абонентского устройства, устанавливаемого при испытании в положения, которые описаны в разделе 6.1.

Е.3 Опорные ручные абонентские устройства

В качестве опорных ручных абонентских устройств используют коммерческие беспроводные ручные устройства, обслуживаемые и распространяемые в соответствии с [24]. Выбор поставщика — в соответствии с соглашением между участвующими сторонами.

Е.4 Настройка мощности

Настройка мощности зависит от точности измерения выходной мощности опорного ручного абонентского устройства, используемого в процессе межлабораторных сравнительных испытаний. Каждое устройство в индивидуальном порядке проверяется участвующей лабораторией при условии, чтобы выходная мощность каждого устройства была в диапазоне ± 0,3 дБ от опорного значения. Измеренная выходная мощность сообщается контролирующей лаборатории. Требуемое значение выходной мощности устройства устанавливают с помощью специального программного обеспечения. Аккумуляторная батарея устройства должна быть полностью заряжена.

Особое внимание должно быть к обеспечению точного измерения выходной мощности. Некоторые ручные абонентские устройства позволяют легко и точно измерять выходную мощность. Простота измерения выходной мощности должна учитываться при выборе опорных ручных абонентских устройств для использования при проведении сравнительных испытаний. При необходимости в период межлабораторных сравнительных испытаний опорные ручные устройства периодически возвращаются в контролирующую лабораторию для проверки выходной мощности и частотных характеристик. Контролирующая лаборатория также проверяет излучаемую мощность опорного ручного абонентского устройства, применяя для этого метод, обеспечивающий высокую стабильность результатов. Кроме того, контролирующая лаборатория проверяет состояние аккумуляторной батареи с тем, чтобы гарантировать одинаковую выходную мощность во всех лабораториях.

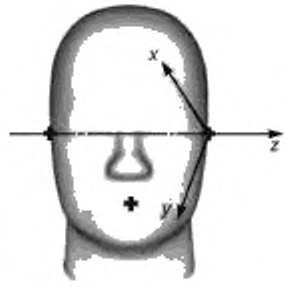
Е.5 Межлабораторные сравнительные испытания — процедура

Процедуры измерения при оценке коэффициента удельного поглощения энергии, применяемые в процессе межлабораторных сравнительных испытаний, те же, что и процедуры, применяемые при проведении испытаний на соответствие согласно разделу 6. Межлабораторные сравнительные испытания проводят с помощью градуированного зонда и проверенной измерительной системы. Каждая лаборатория оформляет полный протокол испытания, соответствующий требованиям разделов 7 и 8, включая в него результаты *валидации системы*, измерения параметров жидкости, значения системной неопределенности измерений и измерений выходной мощности. Результаты межлабораторных сравнительных испытаний должны укладываться в расширенную неопределенность, предусмотренную для оценки воздействия согласно разделу 7. Протоколы испытаний, оформленные разными лабораториями, оценивает и сравнивает специально назначенная контролирующая лаборатория.

Приложение F
(справочное)

Определение системы координат манекена и системы координат испытуемого устройства

Взаимные смещения и повороты указанных ниже дополнительных опорных систем координат позволяют однозначно описывать положение испытуемого устройства относительно манекена и осуществлять его перемещение и вращение для достижения требуемого положения. Система координат манекена показана на рисунке F.1.



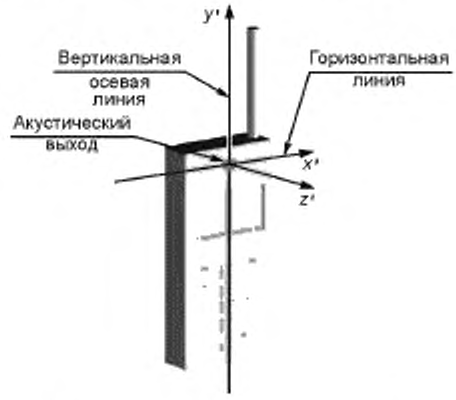
x, y, z — оси системы координат для манекена

Рисунок F.1 — Пример опорной системы координат манекена

Оси *x*, *y* и *z* должны образовывать правую систему координат. Эти оси определяются следующим образом:

- ось *z* — линией, соединяющей левую и правую опорные точки уха и точки, расположенные слева направо. Нулевая точка оси *z* соответствует левой опорной точке уха;
- ось *y* находится в базовой плоскости и перпендикулярна к оси *z*;
- ось *x* — расположена под прямым углом к базовой плоскости и пересекает ее в контрольной точке уха.

Система координат испытуемого устройства показана на рисунке F.2:



x', y', z' — оси системы координат относительно испытуемого устройства

Рисунок F.2 — Пример системы координат испытуемого устройства

Приложение G
(справочное)

Диполи, используемые при валидации

Как указано в приложении D, плоский манекен подвергается воздействию излучения опорного диполя для соответствующей частоты. Опорные диполи подбираются с учетом конкретных диэлектрических параметров и толщины оболочки манекена, указанных в таблице G.1. Опорный диполь устанавливают под днищем манекена и центрируют так, чтобы его ось была параллельна самой длинной стороне манекена. Для обеспечения правильного зазора между верхней поверхностью опорного диполя и нижней поверхностью манекена может быть использована распорка из материала с низким уровнем потерь и низкой диэлектрической проницаемостью. Использование распорки не должно вызывать изменения измеренных средних значений коэффициента удельного поглощения энергии, приведенных к 1 и 10 г ткани, более чем на 1%. Расстояние между нижней поверхностью заполненного жидкостью манекена и центром опорного диполя (обозначают символом «*s*») указывают с точностью до 0,2 мм для каждой заданной частоты. Для уменьшения неопределенности измерения мощности опорный диполь должен иметь характеристику потерь на отражение лучше чем минус 20 дБ (измеряют в испытательной системе). Для выполнения этого требования разрешается осуществлять тонкую настройку опорных диполей установкой на их концах диэлектрических (с низким уровнем диэлектрических потерь) или металлических настроечных элементов (см. рисунок G.1).

Таблица G.1 — Физические размеры опорных диполей

Частота, МГц	Длина *L*, мм	Высота *h*, мм	Ширина *d*, мм
300	396,0	250,0	6,35
450	270,0	166,7	6,35
835	161,0	89,8	3,6
900	149,0	83,3	3,6
1 450	89,1	51,7	3,6
1 800	72,0	41,7	3,6
1 900	68,0	39,5	3,6
1 950	66,3	38,5	3,6
2 000	64,5	37,5	3,6
2 450	51,5	30,4	3,6
3 000	41,5	25,0	3,6

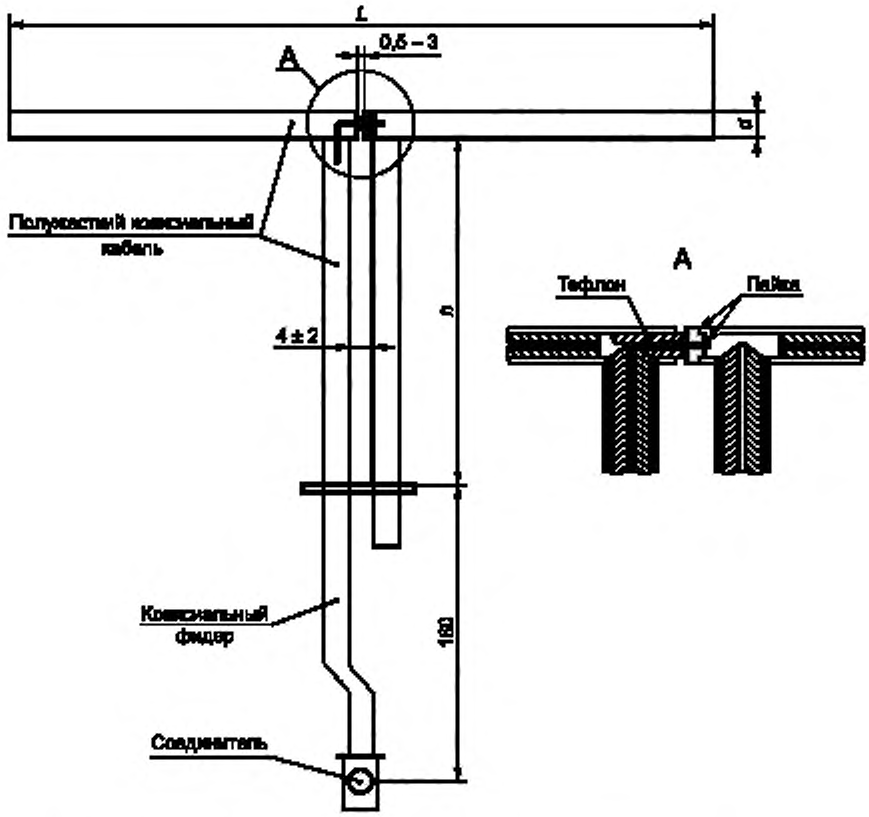
Примечание — Значения для частот 300 и 450 МГц применимы к манекенам с толщиной оболочки 6,3 мм; значения для частот от 835 до 3000 МГц применимы к манекенам с толщиной оболочки 2 мм. Отклонение значений *L*, *h* и *d* должно быть не более ± 2 %.

Для опорных диполей, описанных в приложении *D*, зазор *s* равен:

a) $s = (15 \pm 0,2)$ мм — для $300 \le f \le 1000$ МГц;

b) $s = (10 \pm 0,2)$ мм — для $1000 \text{ МГц} < f \le 3000$ МГц .

Плечи опорного диполя должны быть параллельны плоской поверхности манекена с допустимым отклонением ± 2° или менее (см. рисунок D.1). Это достигается тщательной проверкой горизонтирования пустого манекена и опорного диполя с помощью спиртового уровня.



L — длина диполя; *d* — диаметр диполя; *h* — длина дросселя согласующего устройства

Рисунок G.1 — Механическая конструкция опорного диполя

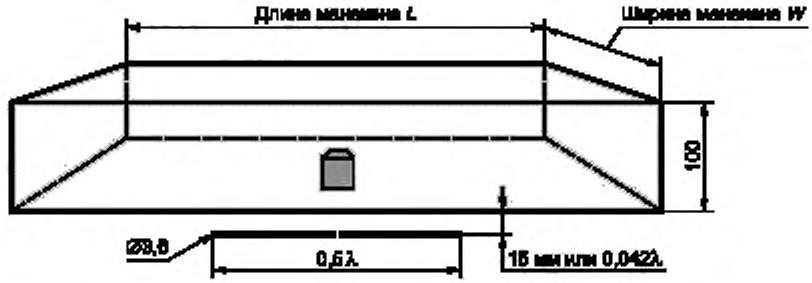
Приложение Н
(справочное)

Плоский манекен

Влияние размеров плоского манекена (см. рисунок Н.1) на поглощение энергии в 10-граммовом кубе внутри полностью жидкого (без короба) манекена рассчитывалось численным методом с использованием коммерческого кода *FDTD* (код конечно-разностного анализа во временной области). Манекен подвергают воздействию излучения соответствующей дипольной антенны, установленной на расстоянии 15 мм (0,042 λ при 840 МГц). Размеры манекена *W* и *L* варьируют от 0,4 до 3 λ. Мощность, поглощенная в кубе, поочередно нормируют относительно тока в точке возбуждения 1 А и мощности в точке возбуждения 1 Вт. Несмотря на то, что при нормировании тока и мощности имели место отклонения значения поглощения мощности в кубе, для обоих способов нормирования рассчитывают минимальные физические размеры, необходимые для поддержания неопределенности измерений в пределах 1 %. Описанные выше условия выполняют, если длина плоского манекена более 0,6 λ и ширина более 0,4 λ, как показано на рисунке Н.2. Влияние ширины манекена незначительно. Однако для поддержания значения неопределенности измерений поглощенной мощности в пределах 1 % ширина не должна быть менее 0,4 λ. Параметры манекена могут масштабироваться с учетом изменения длины волны в свободном пространстве. Зависимость от свойств жидкости не слишком критична, если коэффициент потерь в ней относительно высок.

Примечание — Из-за больших размеров 10-граммовый усредняющий куб более чувствителен к изменению размеров, т.е. неопределенность измерений, связанная с приведением значения к 1 г, будет менее неопределенности, связанной с приведением значения к 10 г.

Эффекты, вызывающие различия, зависят от искажения величины тока диполя и пространственного распределения. Поскольку размеры диполя велики по сравнению с размерами усредняющих объемов, применяемых при измерении коэффициента удельного поглощения, эти искажения увеличиваются с увеличением объема. При проведении настоящего исследования глубина манекена составляла 10 см вместо 15 см, предусмотренных для плоского манекена требованиями приложения D, она была в 2,57 раза больше глубины проникновения поля при 840 МГц и, следовательно, отражение мощности на поверхности жидкости можно считать пренебрежимо малым (менее 1 %).



λ — длина волны в свободном пространстве

Примечание — 10-граммовый куб показан в центре днища плоского манекена.

Рисунок Н.1 — Параметры плоского манекена, предназначенного для определения минимальных значений ширины *W* и длины *L*

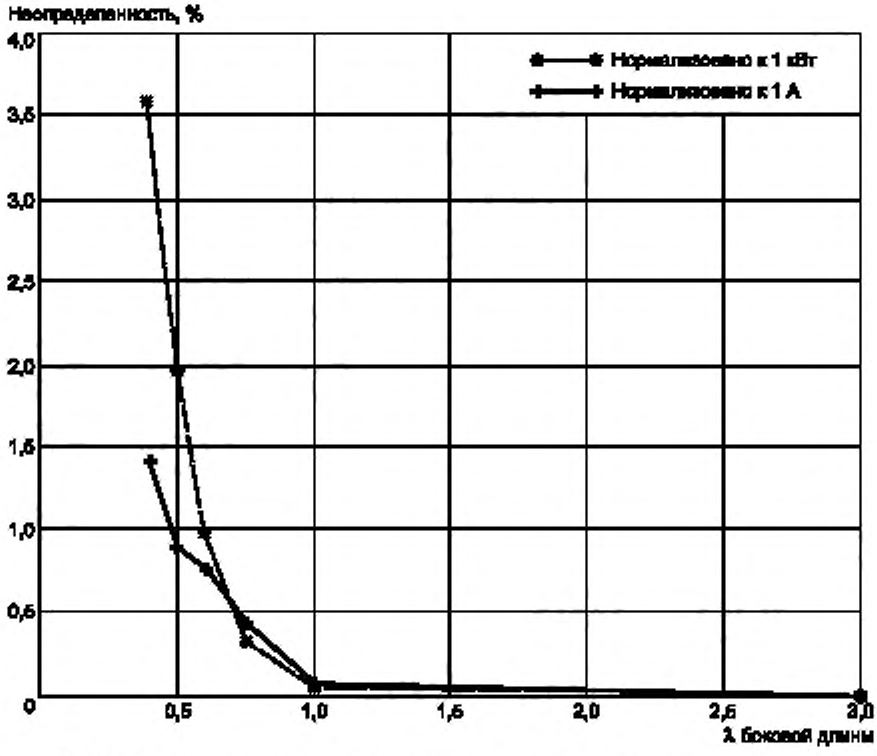


Рисунок Н.2 — Код *FDTD* позволяет определить неопределенность предельного пространственно усредненного коэффициента удельного поглощения энергии для 10 г ткани как функцию параметров плоского манекена относительно бесконечного плоского манекена

Таблица Н.1 — Параметры, использованные для расчета опорных значений коэффициента удельного поглощения энергии, приведенных в таблице D.1

Частота, МГц	Толщина оболочки манекена, мм	Диэлектрическая проницаемость оболочки манекена	Размерные параметры манекена *x*, *y*, *z*, использованные в моделях *FDTD*, мм	Расстояние *s* между стандартным диполем и жидкостью, мм
300	6,3	3,7	1 000, 800, 170	15
450	6,3	3,7	700, 600, 170	15
835	2,0	3,7	360, 300, 150	15
900	2,0	3,7	360, 300, 150	15
1 450	2,0	3,7	240, 200, 150	10
1 800	2,0	3,7	220, 160, 150	10
1 900	2,0	3,7	220, 160, 150	10
1 950	2,0	3,7	220, 160, 150	10
2 000	2,0	3,7	160, 140, 150	10
2 450	2,0	3,7	180, 120, 150	10
3 000	2,0	3,7	220, 160, 150	10

Примечание — В настоящей таблице представлены параметры, использованные при проведении числового моделирования по методу конечно-разностного анализа во временной области.

Приложение I
(справочное)

Рекомендуемые составы жидкостей, эквивалентных ткани головы

I.1 Введение

Диэлектрические свойства жидких материалов, применяемых в манекенах, должны соответствовать перечисленным в таблице 1. Для определения диэлектрических свойств тканеэквивалентных жидкостей, рассчитанных на другие частоты в пределах полосы частот измерений, применяется метод линейной интерполяции. Примеры рецептов жидкостей с параметрами, указанными в таблице 1, представлены в таблице I.1.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Для обеспечения безопасности персонала при работе с любыми материалами пользователи должны следовать правилам, приведенным в «Сборнике правил техники безопасности при работе с материалами» (Material Safety Data Sheet [MSDS]), и/или соответствующим требованиям национального законодательства.

I.2 Ингредиенты

Для производства жидкостей, эквивалентных ткани головы, применяются следующие ингредиенты:

a) сахароза (сахар) (> 98 %);

b) хлористый натрий (соль) (> 99 %);

c) деионизированная вода (минимальное сопротивление 16 МОм);

d) гидроксиэтилцеллюлоза HEC;

e) бактерицид;

f) диэтиленгликоль бутиловый эфир (> 99 %);

g) полиэтиленгликоль моно [4-(1,1,3,3-тетраметилбутил) окись дифенила]. Поставляется как (Triton X-100). Для того чтобы соответствовать составу соли, вещество Triton X-100 должно быть сверхчистым[1)];

h) диацетин;

i) 1,2 % - пропандиол.

Примечание 1— Вязкость тканеэквивалентных жидкостей на основе гидроксиэтилцеллюлозы HEC должна быть достаточно низкой, чтобы не препятствовать движению зонда электрического поля.

2 Сначала соль кладут в воду для приготовления соляного раствора, после чего добавляют вещество Triton X-100.

3 Реальные результаты и процентные соотношения могут отличаться от указанных в зависимости от качества и типа используемых компонентов.

[1)] Составы, содержащие вещество Triton X-100, в настоящее время находятся в стадии изучения и проверки.

I.3 Составы тканеэквивалентных жидкостей (диэлектрическая проницаемость/проводимость)

Таблица I.1 — Рекомендуемые составы с заданными диэлектрическими параметрами

Частота (МГц)	300	450		835	900			1450	1800				1900		1950	2000	2100		2450		3000
№ состава	1	1	3	1	1	2	3	1	1	2	2	3	1	2	4	1	1	2	2	3	2
Ингредиенты (% массы)																					
1,2-пропандиол						64,81															
Диацетин			48,9				49,2					49,43								49,75	
Бактерицид	0,19	0,19	0,5	0,10	0,10		0,5					0,50								0,50	
DGBE								45,51	47,00	13,84	44,92		44,92	13,84	45,0	50,0	50,0	7,99	7,99		7,99
HEC	0,98	0,98		1,00	1,00																
NaCl	5,95	3,95	1,7	1,45	1,48	0,79	1,1	0,67	0,36	0,35	0,18	0,64	0,18	0,35				0,16	0,16		0,16
Сахароза	55,32	56,32		57,00	56,50																
Triton X-100										30,45				30,45				19,97	19,97		19,97
Вода	37,56	38,56	48,9	40,45	40,92	34,40	49,2	53,82	52,64	55,36	54,90	49,43	54,90	55,36	55,0	50,0	50,0	71,88	71,88	49,75	71,88
Измеренные диэлектрические параметры																					
ε'_r	46,0	43,4	44,3	41,6	41,2	41,8	42,7	40,9	39,3	41,0	40,4	39,2	39,9	41,0	40,1	37,0	36,8	41,1	40,3	39,2	37,9
σ (См/м)	0,86	0,85	0,90	0,90	0,98	0,97	0,99	1,21	1,39	1,38	1,40	1,40	1,42	1,38	1,41	1,40	1,51	1,55	1,88	1,82	2,46
Температура (°С)	22	22	20	22	22	22	20	22	22	21	22	20	21	21	20	22	22	20	20	20	20
Заданные значения (согласно таблице 1)																					
ε'_r	45,3	43,5		41,5	41,5			40,5	40,0								39,8		39,2		38,5
σ (См/м)	0,87	0,87		0,90	0,97			1,20	1,40								1,49		1,80		2,40

Примечания

1 Наличие нескольких колонок под одной частотой означает наличие нескольких возможных рецептов.

2 Номер, указатель рецепта: 1 [30], 2 [64], 3 [50], 4 [15].

Приложение J
(справочное)

Измерение диэлектрических свойств жидкостей и оценка неопределенности измерений

J.1 Введение

Порядок измерения диэлектрических свойств тканеэквивалентной жидкости, являющегося частью процедуры проверки характеристик удельного поглощения энергии, приведен в разделе J.2. Раздел J.2 содержит информацию, достаточную для того, чтобы пользователь мог самостоятельно выбрать процедуру измерения, исходя из соображений ее удобства и эффективности. Диэлектрические свойства некоторых образцовых жидкостей приведены в разделе J.6 для оценки эффективности процедур измерения. Общий порядок оценки неопределенности измерения диэлектрических параметров приведен в разделе J.7.

J.2 Методы измерения

Требуемые диэлектрические параметры определяют комплексную относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0$ тканеэквивалентной жидкости при конкретных частотах и температуре. Для измерения диэлектрических свойств тканеэквивалентной жидкости применяют несколько хорошо отработанных методов.

J.2.1 Измерительные средства

Для проведения измерений требуется следующее или равноценное оборудование:

a) векторный анализатор цепей и комплект для проверки *S*-параметров;

b) держатель образца, известный также как элемент для определения диэлектрических свойств или диэлектрический зонд;

c) процедуры испытания и прикладное программное обеспечение для вычисления диэлектрических свойств образца на основе данных измерения *S*-параметра.

Три образца держателя и соответствующие методы испытания описаны в разделах J.3 — J.5. Достижимая точность измерений зависит от качества изготовления элементов испытательной установки. Размеры данных элементов должны соответствовать частотам измерений. Правильность процедур проверяется измерением параметров образцовых жидкостей.

J.2.2 Общие принципы

При использовании всех процедур должны соблюдаться следующие общие условия:

a) держатель образца должен быть абсолютно чистым;

b) все элементы, зонды, кабели и разъемы должны не иметь повреждений;

c) процедура заполнения держателя образца образцом жидкости должна обеспечивать полное заполнение объема без образования воздушных пузырьков;

d) температура образца должна быть зарегистрирована в протоколе, в котором также должно быть отмечено, что соответствующие диэлектрические свойства действительны только для данной температуры;

e) персонал, проводящий измерения, должен быть знаком с характером измерений и должен знать, каких результатов следует ожидать на каждом этапе выполнения процедуры;

f) после градуировки должны быть проведены измерения на образцовой жидкости, чтобы убедиться в правильности работы системы до проведения измерений на образце. Информация о нескольких рекомендуемых образцовых жидкостях приведена в разделе J.6;

g) методы обработки данных, относящихся к измерению комплексного коэффициента отражения и комплексной диэлектрической проницаемости, должны быть точными и соответствовать геометрии используемого держателя образца.

J.3 Измерительная линия

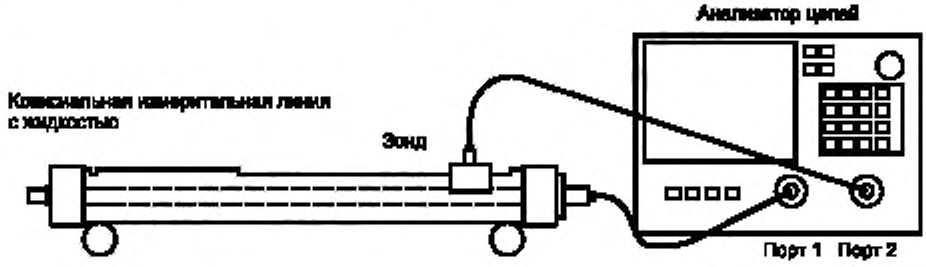
В качестве держателя образца может быть использована замкнутая коаксиальная измерительная линия с движущимся зондом [4]. Анализатор сети посылает радиочастотный сигнал на вход измерительной линии и обеспечивает определение амплитуды и фазы поступающего на образец сигнала как функции положения на линии посредством движущегося зонда.

Процедура испытания должна предусматривать градуировку и параметры настройки анализатора сети для требуемой полосы частот, положение в начале измерений, шаг движения вдоль измерительной линии и общее число следующих одна за другой точек измерения. Прикладное программное обеспечение интерпретирует данные измерений с целью определения диэлектрических свойств образца. Пример применения этой процедуры приведен в следующих разделах.

J.3.1 Конфигурация оборудования

Испытательное оборудование включает в себя коаксиальную измерительную линию передачи с зондом, подсоединенным к анализатору цепей, как показано на рисунке J.1. Амплитудная логарифмическая характеристика и фаза S_{21} должны отображаться одновременно. Мощность источника выставляют на уровень, при котором обеспечивается хорошее соотношение сигнал — шум. Для проверки системы периодически (ежегодно и во всех

случаях изменения измерительной шкалы линии) проводятся измерения на образцовой жидкости. Поскольку измеряемыми величинами являются изменения амплитуды и фазы с изменением расстояния, точность измерительной шкалы является критически существенной.



Примечание — Рекомендуется также использовать средства контроля температуры образца, не показанные на данной схеме.

Рисунок J.1 — Конфигурация измерительной линии

Анализатор цепей посылает сигнал на конец коаксиальной измерительной линии. Зонд, погруженный через слот линии в тканеэквивалентную жидкость, определяет амплитуду и фазу в точках измерения по всей длине линии. Перед подключением держателя образца проводят полную градуировку анализатора цепей в режиме «на проход». При этом должны соблюдаться следующие правила:

a) измерительную линию заполняют водой осторожно так, чтобы избежать образования воздушных пузырьков. При выполнении этой операции измерительная линия должна находиться в горизонтальном положении;

b) зонд вставляют образца в разъем, ближайший к входному разъему измерительной линии так, чтобы тканеэквивалентная жидкость находилась на одном уровне с внутренней поверхностью линии, и выравнивают по четко определенной риске на шкале длины измерительной линии;

c) зонд вставляют перпендикулярно к продольной оси измерительной линии, пока не будет достигнуто стабильное и однозначное считывание амплитуды. Не следует вставлять зонд слишком глубоко в разъем коаксиальной измерительной линии, так как это может вызвать чрезмерное искажение характеристики распространения поля.

J.3.2 Процедура измерения

a) Настраивают и градуируют анализатор цепей.

b) Определяют на измерительной линии 10 — 20 точек измерения частотной амплитудной логарифмической характеристики и фазы, соответствующих изменению амплитуды приблизительно на 30 дБ.

c) Строят график изменения частотной амплитудной логарифмической характеристики S_{21} соответственно изменению расстояния.

d) Определяют, насколько близко точки графика следуют аппроксимации отрезками прямой, приняв за основу коэффициент корреляции или аналогичную статистическую величину. Имеющиеся данные должны обеспечивать хорошую линейную аппроксимацию кривой (ожидаемый коэффициент корреляции для материалов с высоким уровнем диэлектрических потерь $r^2 > 0{,}99$). В противном случае повторно измеряют параметры жидкости, предварительно увеличив число точек так, чтобы перепад амплитуды увеличился с 30 до 40 дБ.

Примечание — При работе с материалами с низким уровнем диэлектрических потерь длина измерительной линии должна быть достаточной для того, чтобы не допустить отражений с подключенного к нагрузке конца.

e) Рассчитывают проводимость и относительную диэлектрическую проницаемость тканеэквивалентной жидкости с помощью уравнений, взятых из [56] и [65]:

$$\bar{\alpha} = \frac{m_m \ln(10)}{20}, \text{ Нп/см},$$

$$\bar{\beta} = \frac{m_p \pi}{180}, \text{ рад/см},$$

$$\varepsilon'_r = \frac{(\bar{\beta})^2 - (\bar{\alpha})^2}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0},$$

$$\sigma = \frac{2\bar{\alpha}\bar{\beta}}{\omega\varepsilon_0}\left(\frac{100\,\text{см}}{\text{м}}\right), \text{ См/м},$$

где m_α и m_β — тангенсы угла наклона подобранных по методу наименьших квадратов прямых частотной амплитудной логарифмической характеристики и фазовой характеристики соответственно;

$\bar{\alpha}$ и $\bar{\beta}$ — средние коэффициенты затухания и распространения для линии.

J.4 Контактный зонд

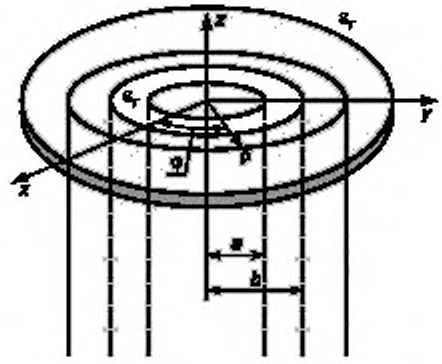
Контактные зонды — это открытые на концах секции коаксиальной линии передачи, обычно с отгибом на конце, служащим элементом для отражения краевых полей. Измерения проводят путем приведения зонда в соприкосновение с образцом и определения полной проводимости или коэффициента отражения в режиме холостого хода с использованием анализатора цепей или эквивалентного оборудования [3], [16], [54]. Коаксиальные зонды могут также применяться для испытания твердых диэлектриков, например, выборочных проб материалов, используемых для изготовления держателей испытуемых устройств и манекенов. Для того чтобы минимизировать неопределенность измерений, вводимую использованием контактных зондов, твердые поверхности должны быть тщательно отполированы [1].

Процедура испытания должна включать в себя градуировку и настройку анализатора цепей для заданной полосы частот. Прикладное программное обеспечение должно обеспечивать интерпретацию данных измерений для вычисления диэлектрических свойств образца как функции частоты. Для применения этого метода требуется разработка или получение из коммерческого источника зонда и пакета программного обеспечения для анализатора цепей. При описании метода должны быть указаны размер зонда и рабочая полоса частот. Пример процедуры приводят в последующих разделах.

J.4.1 Конфигурация оборудования

В состав оборудования входит зонд, подключенный к одному из разъемов векторного анализатора цепей. Зонд представляет собой коаксиальную линию с открытым концом, как показано на рисунке J.2. Используется цилиндрическая система координат ρ, φ, *z*, где ρ — расстояние по радиусу до оси, φ — угловое смещение вокруг оси, *z* — смещение вдоль оси, *a* — радиус внутреннего проводника, а *b* — внутренний радиус внешнего проводника.

Держатель образца представляет собой неметаллический контейнер, размер которого должен быть большим по сравнению с размером погруженного в него зонда. Зонд с внешним диаметром *b*, составляющим от 2 до 4 мм, подходит для измерения параметров тканеэквивалентных жидкостей в полосе частот от 300 до 3 ГГц. Такой размер зонда соответствует объемам образца 50 см^3 и более. Для работы с большими объемами могут применяться более крупные зонды с внешним диаметром *b* не более 7 мм. Обычно зонд имеет фланцевый отгиб на конце, чтобы в большей степени соответствовать допущению о бесконечном отражающем элементе, на основании которого рассчитывается полная проводимость.



a — радиус внутреннего проводника; *z* — смещение вдоль оси; *b* — внутренний радиус ε_r внешнего проводника; ρ — расстояние по радиусу до оси; φ — угловое смещение вокруг оси; *x*, *y*, *z* — прямоугольные декартовы координаты

Рисунок J.2 — Коаксиальный зонд с открытым концом с внутренним и внешним радиусами *a* и *b* соответственно

Точность измерений в режиме короткого замыкания должна проверяться после каждой градуировки на нескольких частотах. Короткого замыкания можно добиться, аккуратно приложив к открытому концу зонда небольшой кусочек алюминиевой фольги. Для того чтобы контакт был хорошим, конец зонда должен быть плоским и не окисленным [2]. Крупные датчики обычно лучше реагируют на замыкание фольгой. Хорошего контакта можно добиться, воспользовавшись некоторыми коммерческими зондами диаметром 4,6 мм, поставляемыми в комп-

лекте с дисковыми металлическими элементами для короткого замыкания. Для повышения стабильности может потребоваться прижать диск рукой.

Значительная неопределенность измерений в результате «фланцевых резонансов» может иметь место, если диаметр фланца приблизительно равен половине длины волны в диэлектрической среде [6]. Эти эффекты особенно выражены в жидкостях с высокой диэлектрической проницаемостью, имеющих тангенс угла диэлектрических потерь менее 0,25 (для частот, используемых мобильными телефонами, это вода, метиловый спирт и диметилсульфоксид). Исходя из этого, настоятельно рекомендуется проводить градуировку крупных датчиков, используя жидкости с большим тангенсом угла потерь, например этиловый спирт. На некоторых частотах могут возникать проблемы с использованием воды для калибровки 7-миллиметровых фланцевых коаксиальных датчиков. Тканеэквивалентные жидкости имеют тангенс угла диэлектрических потерь около 0,5, что является довольно высоким значением, позволяющим гарантировать практическое отсутствие эффектов резонанса, независимо от размера используемого датчика.

Анализатор цепей настраивается для измерения амплитуды и фазы полной проводимости, после чего проводится двухполюсная градуировка параметров отражения в плоскости зонда. Для этого жидкости, для которых может быть рассчитан коэффициент отражения, приводят в соприкосновение с зондом. Такую градуировку проводят в трех режимах: в условиях короткого замыкания, в воздухе и в деионизированной воде при четко определенной температуре (для градуировки могут быть использованы и другие образцовые жидкости, например метиловый или этиловый спирты). Градуировка — важная часть процедуры измерения, поэтому важно, чтобы она была выполнена правильно. Правильность градуировки можно проверить путем повторного измерения в режиме короткого замыкания, которое должно показать, что коэффициент отражения Г = – 1,0 (единиц линейных измерений) получен обоснованно.

J.4.2 Процедура измерения

a) Настраивают и градуируют анализатор цепей и систему зондирования.

b) Наливают образец в неметаллический контейнер и погружают в него зонд. Для фиксации зонда рекомендуется использовать держатель или зажим; зонд должен быть установлен так, чтобы его лицевая сторона была под углом к поверхности жидкости — это позволит свести к минимуму образование воздушных пузырьков под фланцем.

c) Измеряют комплексную полную проводимость применительно к апертуре зонда.

d) Рассчитывают комплексную относительную проницаемость $\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\sigma / \omega\varepsilon_0$, например, с помощью следующего уравнения [54]:

$$Y = \frac{j2\omega\varepsilon'_r\varepsilon_0}{[\ln(b/2)]^2}\int_a^b\int_a^b\int_0^{\pi}\cos\varphi'\frac{\exp\left[-j\omega(\mu_0\varepsilon'_r\varepsilon_0)^{\frac{1}{2}}\right]}{r}d\varphi'd\rho'd\rho.$$

Значение может быть вычислено численным методом или разложено в ряд и упрощено в соответствии с [16], [40], [41], [42]. Уравнение решается сначала для опорного волнового числа k, а затем для опорного значения комплексной проницаемости; при этом используется метод Ньютона-Рафсона или другие итеративные аппроксимации. Можно воспользоваться и другими численными методами, например, описанными в [43], [45], при условии, что прикладное программное обеспечение тщательно испытано и проверено измерением параметров образцовых жидкостей. Коммерческие коаксиальные зонды с открытым концом обычно рассчитаны на использование различных вариантов данного теоретического и методологического подхода.

J.5 Линия передачи типа ТЕМ

Данный метод основан на измерении комплексного коэффициента передачи наполненной испытательной жидкостью коаксиальной линии передачи типа ТЕМ [60]. Коэффициент передачи измеряют с помощью анализатора цепей, чтобы определить амплитуду и фазу коэффициента рассеивания S_{21}, на основе которого рассчитывают комплексную диэлектрическкую проницаемость. Описание процедуры испытания должно включать в себя настройки и параметры градуировки анализатора цепей для рабочей полосы частот. Прикладное программное обеспечение должно интерпретировать данные измерений, позволяя определять диэлектрические свойства образца как функцию частоты.

J.5.1 Конфигурация оборудования

Конфигурация измерительной установки показана на рисунке J.3. Держатель образца представляет собой полосковую линию передачи с открытой стенкой, состоящую из цилиндрического центрального проводника, двух плоских вертикальных (боковых) заземлителей, одной оптически прозрачной пластмассовой донной стенки, открытой верхней части и датчика температуры. Длину d выбирают для данной полосы частот так, чтобы эффект многократных отражений внутри датчика был незначительным, а общее затухание — не выходило за рамки динамического диапазона анализатора сети. Так, например, два датчика разной длины позволяют охватить всю полосу частот от 800 до 2000 МГц. Образцовую жидкость аккуратно наливают в держатель или вводят в него шприцем и проверяют на наличие воздушных пузырьков через прозрачные стенки.

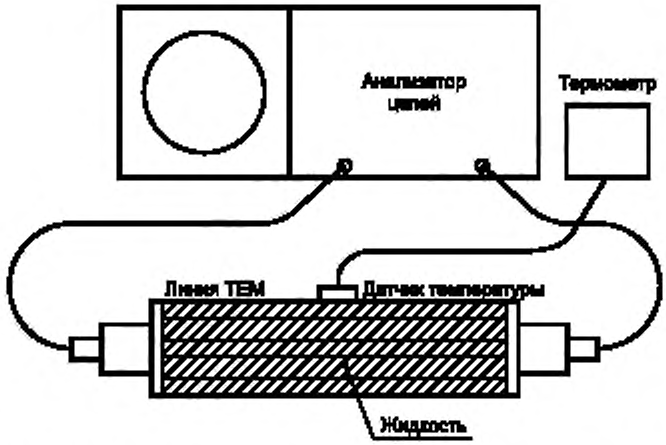


Рисунок J.3 — Конфигурация установки для проверки диэлектрических параметров на основе линии типа ТЕМ [60]

J.5.2 Процедура измерения

a) Настраивают и калибруют анализатор сети.

b) Регистрируют амплитуду и фазу S^0_{21} пустой камеры на нужных частотах.

c) Вводят образцовую жидкость в камеру и повторяют измерение коэффициента передачи с образцом S^0_{21}.

d) Удаляют образцовую жидкость из линии ТЕМ, тщательно промывают ее изнутри водой и вытирают насухо.

e) Снова подсоединяют коаксиальную линию к анализатору сети. Убеждаются в том, что амплитуда и фаза S^0_{21} не изменились (отклонение амплитуды должно быть менее 0,1 дБ, а фазы — 0,5°). Данный шаг выполняют только при измерении параметров нескольких образцов.

f) Рассчитывают комплексную диэлектрическую проницаемость образцовой жидкости с использованием значений амплитуды и фазы S^S_{21} / S^0_{21}, решив следующие уравнения:

$$\frac{S^S_{21}}{S^0_{21}} = \frac{(1-\Gamma^2)exp[-j(k-k_0)d]}{1-\Gamma^2 exp(-j2kd)};$$

$$\Gamma = \frac{1-\sqrt{\varepsilon_r}}{1+\sqrt{\varepsilon_r}};$$

$$k = \frac{2\pi f}{c_0}\sqrt{\varepsilon_r},$$

где Γ — коэффициент отражения на любом конце линии ТЕМ;

k — волновое число в жидкости;

k_0 — волновое число в свободном пространстве;

d — длина держателя образца (линии ТЕМ);

f — частота;

c_0 — скорость света в свободном пространстве;

$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\sigma / \omega\varepsilon_0$ — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость образца.

J.6 Диэлектрические свойства образцовых жидкостей

Процедуры, описанные в разделе J.2, содержат рекомендацию проводить проверку системы с использованием образцовых жидкостей с устойчивыми диэлектрическими свойствами. При этом требуется две образцовые жидкости: одна для градуировки, а другая — для проверки правильности градуировки. Ниже приведено общее уравнение, позволяющее рассчитывать зависящие от частоты диэлектрические свойства:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau)1 - \alpha]\beta} + \frac{\sigma_f}{j\omega\varepsilon_0}$$

Это соответствует дебаевскому уравнению для $\alpha = 0$ и $\beta = 1$, уравнению Коула и Коула для $\beta = 1$ и $0 < \alpha < 1$ и отношению Коула-Дэвидсона для $\alpha = 0$ и $0 < \beta < 1$ [20], для которых:

ε_s — статическая проницаемость или проницаемость на низкой частоте;

ε_∞ — асимптотическая проницаемость или проницаемость на высокой частоте;

τ — время релаксации;

σ_f — ионная проводимость.

Параметры для расчета свойств нескольких образцовых жидкостей с помощью данного уравнения представлены в таблице J.1. Такими жидкостями являются: диметилсульфоксид, метанол, этанол и деионизированная вода. Для жидкостей, перечисленных в таблице J.1, параметры α и σ_f имеют нулевые значения. Опорные параметры получены с помощью разных методов испытания, описанных в литературе. В целом результаты, полученные в двухпортовых камерах, образованных замкнутой линией передачи, принято считать наиболее точными, но вместе с тем все результаты, представленные в таблице J.1, независимо от их источника, относительно хорошо согласуются. Таблица J.2 содержит контрольные значения относительной диэлектрической проницаемости и проводимости для температуры 20°С. При использовании других образцовых жидкостей в протокол испытания должны быть включены установленные для них контрольные значения и ссылки на соответствующую техническую документацию.

Рекомендуется выбирать в качестве образцовых жидкости, сходные по своим диэлектрическим свойствам с тканеэквивалентными жидкостями. При приготовлении любых образцовых жидкостей необходимо строго следовать рецептуре, а диэлектрические свойства этих жидкостей измерять при указанной температуре. Во избежание загрязнения воздуха и испарения нельзя оставлять смеси открытыми. Чистота образцовых жидкостей должна быть высокой, т.е. соответствовать аналитическому или более высокому уровню. Открытые сосуды с реагентами хранятся в соответствии с рекомендациями изготовителя в течение установленного им срока хранения.

Примечание — Все сотрудники должны знать и выполнять правила, предписанные для каждой конкретной жидкости «Сборником правил техники безопасности при работе с материалами» (Material Safety Data Sheet [MSDS]).

Таблица J.1 — Параметры для расчета диэлектрических свойств различных образцовых жидкостей

Образцовая жидкость	Температура, °С	Номер для ссылок	Модель	ε_s	ε_∞	τ (ps)	β
Деионизированная вода	20	[28]	Дебай	80,21	5,6	9,36	1
Деионизированная вода	25	[28]	Дебай	78,36	5,2	8,27	1
DMS	20	[19]*	Дебай	47,13	7,13	21,27	1
DMS	25	[19]*	Дебай	46,48	6,63	19,18	1
DMS	25	[29]	Коул-Дэвидсон	47,0	3,9	21,1	0,878
Этандиол	20	[37]	Коул-Дэвидсон	41,4	3,7	164	0,8
Метанол	20	[16]	Дебай	33,7	4,8	53,8	0
Метанол	20	[19]*	Дебай	33,64	5,68	56,6	0
Метанол	25	[19]*	Дебай	32,67	5,58	50,8	0

* Данные измерений имеются только для 5 ГГц.

Таблица J.2 — Диэлектрические свойства образцовых жидкостей при 20°С

Частота	Метанол [16]		*DMS* [19]		Деионизированная вода [28]		Этандиол [37]	
МГц	ε'_r	σ	ε'_r	σ	ε'_r	σ	ε'_r	σ
300	33,33	0,05	47,07	0,03	80,19	0,02	39,01	0,14
450	32,94	0,11	46,99	0,06	80,16	0,05	34,49	0,30
835	31,37	0,35	46,64	0,20	80,03	0,17	29,15	0,75
900	31,04	0,41	46,56	0,24	80,00	0,20	28,00	0,83
1450	27,77	0,92	45,68	0,60	79,67	0,51	20,38	1,34
1800	25,51	1,27	44,94	0,91	79,38	0,78	17,23	1,58
1900	24,88	1,37	44,71	1,01	79,29	0,87	16,51	1,63
2000	24,25	1,47	44,46	1,11	79,19	0,96	15,85	1,69
2450	21,57	1,89	43,25	1,61	78,69	1,44	13,49	1,89
3000	18,76	2,33	41,59	2,31	77,96	2,13	11,56	2,07

J.7 Оценка неопределенности измерений диэлектрических свойств образцовых жидкостей

Процедуры измерения, описанные в настоящем приложении, предусматривают оценку диэлектрических свойств с использованием векторных анализаторов цепей. Анализаторы цепей требуют градуировки, позволяющей учитывать и вычитать из результата измерения неустранимые потери и отражения. Оценка неопределенности измерения диэлектрических параметров формируется из неточностей данных градуировки, ухода параметров анализатора и случайных ошибок. Другими источниками неопределенности измерений являются поправки на свойства держателя образца, отклонения его размеров от оптимальных для конкретных частот и свойства образцов. Они имеют место независимо от типа держателя образцов и характера разброса измеряемых параметров. Неопределенность измерения, вводимая подбором прямой линии при использовании измерительной линии, может быть оценена посредством анализа методом наименьших квадратов [59].

Пример шаблона неопределенности измерений приведен в таблице J.3. Перечисленные в нем влияющие величины могут быть или не быть применимыми к конкретной испытательной установке или процедуре; в некоторых испытательных конфигурациях могут потребоваться компоненты, не включенные в этот шаблон. Таблица J.3 содержит также примеры числовых значений. Реальные значения неопределенности измерений, зависящие от особенностей конкретных испытательных установок, могут и должны отличаться от указанных значений. Неопределенности измерений диэлектрических свойств оценивают измерением параметров образцовых жидкостей, имеющих четкие характеристики в соответствии с [10], [26], [39], [47]. Измерение проводят в следующем порядке:

a) Настраивают и градуируют анализатор цепей для просмотра достаточно большой полосы частот относительно интересующей центральной частоты, например ± 100 МГц относительно частоты 835 МГц для пяти или более частот диапазона частот передачи устройства.

b) Измеряют параметры образцового материала не менее чем *n* раз, чтобы рассчитать среднее значение и стандартное отклонение относительной диэлектрической проницаемости и проводимости для каждой центральной частоты и соседних частот диапазонов частот, на которых работает устройство.

c) С целью проверки правильности частотной градуировки для каждого результата испытаний, полученных при выполнении требований перечисления b), рассчитывают разницу между измеренными и соответствующими контрольными величинами (см. пункт J.6, таблица J.1) для пяти или более частот диапазона частот передачи устройства с помощью следующих уравнений:

$$\varepsilon'_{r\,tolerance}[\%] = 100\left|\frac{\varepsilon'_{r\,measured} - \varepsilon'_{r\,ref}}{\varepsilon'_{r\,ref}}\right|;$$

$$\sigma_{tolerance}[\%] = 100\left|\frac{\sigma_{measured} - \sigma_{ref}}{\sigma_{ref}}\right|.$$

d) При наличии заданных стандартных отклонений (см. 7.1.2) значений диэлектрической проницаемости и проводимости рассчитывают стандартное отклонение среднего значения ($s/\sqrt{n}$), например, по [61]. При этом используют максимальное для данной частоты значение из ряда *n* значений допустимых отклонений диэлектри-

ческой проницаемости и проводимости, определенных при выполнении перечисления c). В качестве альтернативы можно использовать стандартное отклонение для серии испытаний, указанное в колонке *a* таблицы J.3.

e) Оценивают неопределенность измерений для остальных составляющих, представленных в таблице J.3 (и, по мере необходимости, составляющих, не вошедших в данную таблицу), по типу B применительно к рассматриваемой полосе частот.

f) Индивидуальные значения суммарной стандартной неопределенности измерений для ε'_r и σ соответственно вносят в колонку значений неопределенности и строку показателей испытательной жидкости таблицы J.3. Полностью заполненную таблицу J.3 включают в протокол испытаний наряду с обоснованием использования или пропуска тех или иных влияющих величин.

g) Измеряют параметры второго опорного материала, чтобы проверить относительную правильность градуировки и убедиться в том, что результаты измерений согласуются с опорными значениями (см. пункт J.6), как это предусмотрено перечислением c). При возникновении подозрений в уходе параметров оборудования возвращаются к испытанию образцовых жидкостей, предусмотренному перечислением b).

Таблица J.3 — Пример шаблона значений неопределенности измерений и числовых значений для измерений диэлектрической проницаемости ε_r и проводимости σ

	a		*b*	*c*	$u_i = (a/b) \times (c)$	
Составляющая неопределенности	Значение допуска/ неопределенности (± %)	Распределение вероятности	Делитель	c_i	Стандартная неопределенность (± %)	v_i или v_{eff}
Повторяемость (*n* повторений, середина диапазона)		*N*	1	1		$n - 1$
Образцовая жидкость ε'_r или σ		*R*	$\sqrt{3}$	1		∞
Уход параметров анализатора сети, ошибка линеаризации и т.д.		*R*	$\sqrt{3}$	1		∞
Отклонения параметров кабеля испытательного разъема		*U*	$\sqrt{2}$	1		∞
Суммарная стандартная неопределенность						

Примечание — Обозначения колонок *a*, *b* и *c* даны исключительно для удобства ссылок. Обычно для каждой образцовой жидкости требуются отдельные таблицы для ε'_r и σ.

Приложение К
(обязательное)

Сведения о соответствии национальных стандартов Российской Федерации ссылочным международным стандартам

Таблица К.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
Руководство ИСО/МЭК: 1995	РМГ 43 — 2001 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»
ИСО / МЭК 17025: 2005	ГОСТ Р ИСО / МЭК 17025 — 2006 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»

Библиография

[1] ARAI, M.J., BINNER, G.P., and CROSS, T.E. Estimating errors due to sample surface roughness in microwave complex permittivity measurements obtained using a coaxial probe. *Electron. Lett.*, Jan. 19, 1995, vol. 32, no. 2, pp. 115—117

[2] BAO, J.Z., SWICORD, M.L., and DAVIS, C.C. Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol. *J. Chem. Phys.*, Mar. 12, 1996, vol. 104, no. 12, pp. 4441—4450

[3] BLACKHAM, D.V. and POLLARD, R.D. An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe. *IEEE Trans. Instrumen. Meas.*, Oct. 1997, vol. 46, no. 5, pp. 1093—1099

[4] CHOU, C.K., CHEN, G.W., GUY, A.W. and LUK, K.H. Formulas for preparing phantom muscle tissue at various radiofrequencies. *Bioelectromag.*, 1984, vol.5, pp. 435—441

[5] CHRIST, A., CHAVANNES, N., POKOVIC, K, GERBER, H.U. and KUSTER, N. Numerical and Experimental Comparison of Human Head Models for SAR Assessment. *Proceedings of Millennium Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Heraklion, Kreta, Greece, Oct. 2000, pp. 234—240

[6] CLARKE, R.N., GREGORY, A.P., HODGETTS, T.E., and SYMM, G.T. Improvements in coaxial sensor dielectric measurement: relevance to aqueous dielectrics and biological tissue. In *Microwave Aquametry: Electromagnetic Wave Interaction With Water-containing Materials*, A. Kraszewski, ed., New York: IEEE Press, 1996, pp. 279—297

[7] DIECK, R.H. *Measurement Uncertainty: Methods and Applications*. North Carolina, Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1992

[8] DROSSOS, A., SANTOMAA, V. and KUSTER, N. The dependence of electromagnetic energy absorption upon human head tissue composition in the frequency range of 3003000 MHz. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Nov. 2000, vol. 48, no. 11, pp. 1988—1995

[9] EA-2/07 (rev.01) *EAL Strategy to Achieve Comparability of Results in Calibration and Testing*, Mar. 1997

[10] EVANS, S. and MICHELSON, S.C. Intercomparison of dielectric reference materials available for the calibration of an open-ended probe at different temperatures. *Meas. Sci. Tech.*, Dec. 1995, vol. 6, no. 12, pp. 1721—1732

[11] FARAONE, A., McCOY, D. O., CHOU, C. K., and BALZANO, Q. Characterization of miniaturized E-field probes for SAR measurements. *IEEE Intl. Symp. Electromag. Compat.*, Washington, DC, 2000, pp. 749—754

[12] FERREIRA P.J.S.G. Non-iterative and fast iterative methods for interpolation and extrapolation. *IEEE Trans. Sig. Proc.*, Nov 1994, vol. 41, pp. 3278—3282

[13] FIEGUTH, P.W., KARL, W.C., WILLSKY, A.S. and WUNSCH, C. Multi-resolution optimal interpolation and statistical analysis of TOPEX/POSEIDON satellite altimetry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Mar. 1995, vol. 33, pp. 280—292

[14] FORD, C and ETTER, D.M. Wavelet basis reconstruction of non uniform sampled data. *IEEE Trans. Circuits Sys. II: Analog Dig. Sig. Proc.*, Aug. 1998, vol. 45, no. 8, pp. 1165—1168

[15] FUKUNAGA, K., WATANABE, S., WAKE, K., and YAMANAKA, Y. Time dependence of tissue-equivalent dielectric liquid materials and its effect on SAR. *EMC Europe Symp.*, Sorrento, Italy, Sep. 2002

[16] GABRIEL, C., CHAN, T.Y.A., and GRANT, E.H. Admittance models for open ended coaxial probes and their place in dielectric spectroscopy. *Phys. Med. Biol.*, 1994, vol. 39, no.12, pp. 2183—2200

[17] GABRIEL, S., LAU, R.W. and GABRIEL, C. The dielectric properties of biological tissues: 3. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys. Med. Bio.*, 1996, vol. 41, no. 11, pp. 2271—2293

[18] GORDON, C.C., CHURCHILL, T., CLAUSER, C.E., BRADTMILLER, B., McCONVILLE, J.T., TEBBETTS I. and WALKER, R.A., 1988 *Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel: Methods and Summary Statistics*. Technical Report NATICK/TR-89/044, U.S. Army Natick Research, Development and Engineering Center, Massachusetts: Natick, Sep. 1989

[19] GREGORY, A.P. and CLARKE, R.N. *Tables of the Complex Permittivity of Dielectric Reference Liquids at Frequencies up to 5 GHz*. NPL Report CETM 33, Centre for Electromagnetic and Time Metrology. Teddington, England: National Physical Laboratory, 2001

[20] HILL, N.E., VAUGHAN, W.E., PRICE, A.H., and DAVIES, M. *Dielectric Properties and Molecular Behaviour*. London: Van Nostrand Reinhold, 1969

[21] IEC 60050 *International Electrotechnical Vocabulary*

[22] IEEE Std 1528 *Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques*, New York: Institute Electrical and Electronics Engineers, Dec. 2003

[23] ISO/IEC DIR-2 (2001-7) *IEC Directives — Part 2: Rules for the structure and drafting of International Standards*. Geneva: International Electrotechnical Commission

[24] ISO/IEC Guide 43-1:1997 *Proficiency testing by interlaboratory comparisons — Part 1: Development and operation of proficiency testing schemes*. Geneva: International Organization for Standardization

[25] ISO/IEC Guide *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva: International Organization for Standardization, 1995

[26] JENKINS, S., HODGETTS, T.E., CLARKE, R.N., and PREECE, A.W. Dielectric measurements on reference liquids using automatic network analysers and calculable geometries. *Meas. Sci. Tech.*, July 1990, vol. 1, no. 7, pp. 691—702

[27] JOKELA, K., HYYSALO, P. and PURANEN, L. Calibration of specific absorption rate (SAR) probes in waveguide at 900 MHz. *IEEE Trans. Instrumen. Meas.*, Apr. 1998, vol. 47, no. 2, pp. 432—438

[28] KAATZE, U. Complex permittivity of water as function of frequency and temperature. *J. Chem. Engin. Data*, 1989, vol. 34, no. 4, pp. 371—374.

[29] KAATZE, U., POTTEL R., and SCHAFER M. Dielectric spectrum of dimethyl sulfoxide/water mixtures as a function of composition. *J. Phys. Chem.*, 1989, vol. 93, pp. 5623—5627

[30] KANDA, M.Y., BALLEN, M., CHOU, C.K. Formulation and characterization of tissue simulating liquids used for SAR measurement (500—2000 MHz). *Asia-Pacific Radio Science Conference*, Tokyo, Japan, Aug. 1—4, 2001, pp. 274

[31] KUSTER N., KÄSTLE, R., and SCHMID, T. Dosimetric evaluation of mobile communications equipment with known precision (invited paper). *IEICE Trans. Commun.*, May 1997, vol. E80-B, no. 5, pp. 645—652

[32] KUSTER, N., BALZANO, Q. and LIN, J.C., Eds. *Mobile Communications Safety*. London: Chapman & Hall, 1997

[33] LANCASTER, P. and SALKAUSKA, K. *Curve and Surface Fitting: An Introduction*. New York: Academic Press, 1986

[34] LEE, A.K., and PACK, J.K. Effect of head size for cellular telephone exposure on EM absorption. *IEICE Trans. Commun.*, Mar. 2002, vol. E85-B, no. 3, pp. 698—701

[35] LEE, A.K., CHOI, H.D., LEE, H.S., and PACK, J.K. Human head size and SAR characteristics for handset exposure. *ETRI J.*, Apr. 2002, vol. 24, no. 2, pp. 176—179

[36] LEISTEN, O., VARDAXAGLOU, Y., SCHMID, T., ROSENBERGER, B., AGBORAW, E., KUSTER, N., and NICOLAIDIS, G. Miniature dielectric-loaded personal telephone antennas with low user exposure. *Electron. Lett.*, Aug. 20, 1998, vol. 34, no. 17, pp. 1628-1629

[37] LEVIN, V.V. and PODLOVCHENKO, T.L. Dispersion of the dielectric permittivity of ethylene glycol. *Zhurnal Strukturnoi Khimii*, 1970, vol. 11, pp. 766—767

[38] MEIER, K., BURKHARDT, M., SCHMID, T. and KUSTER, N. Broadband calibration of E-field probes in lossy media. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Oct. 1996, vol. 44, no. 10, pp. 1954—1962

[39] MIGLIORE, M.D. Partial self-calibration method for permittivity measurement using truncated coaxial cable. *Electron. Lett.*, July 20, 2000, vol. 36, no. 15, pp. 1275—1277

[40] MISRA, D. A quasi-static analysis of open-ended coaxial lines. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Oct. 1987, vol. 35, no. 10, pp. 925—928

[41] MISRA, D., CHABBRA, M., EPSTEIN, B.R., MIROTZNIK, M., and FOSTER, K.R. Noninvasive electrical characterization of materials at microwave frequencies using an open-ended coaxial line: test of an improved calibration technique. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Jan. 1990, vol. 38, no. 1, pp. 8—14

[42] MISRA, D. On the measurement of the complex permittivity of materials by an open-ended coaxial probe. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, May 1995, vol. 5, no. 5, pp. 161—163

[43] MOSIG, J.R, BESSON, J.C.E, GEX-FABRY, M. and GARDIOL, F.E. Reflection of an open-ended coaxial line and application to non-destructive measurement of materials. *IEEE Trans. Instrumen. Meas.*, 1981, IM-30, pp 46—51

[44] NAHMAN, N.S., KANDA, M., LARSEN, E.B. and CRAWFORD, M.L. Methodology for standard electromagnetic field measurements. *IEEE Trans. Instrumen. Meas.*, Dec. 1985, vol. IM-34, no. 4, pp. 490—503

[45] NEVELS, R.D., BUTLER, C.M. and YABLON, W. The annular slot antenna in a lossy biological medium. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1985, MTT-30, pp 314—319

[46] NIST TN1297 *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1994

[47] NYSHADHAM, A., SIBBALD, C.L., and STUCHLY, S.S. Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration — an uncertainty analysis. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Feb. 1992, vol. 40, no. 2, pp. 305—314

[48] PERSON C., AHLONSOU, L.N. and GRANGEAT, C. New test bench for the characterization of SAR measurement probes used in tissue equivalent liquids. *Bioelectromagnetics Society 22nd Annual Meeting*, Munich Germany, June 11—16, 2000

[49] PERSON, C., TANNÉ, G., AHLONSOU, L.N., NGOUNOU, C. and GRANGEAT C. New reference antennas for SAR probe calibration in tissue equivalent liquid. *Millennium Conference on Antennas and Propagation, AP2000*, Davos, Switzerland: April 9—14, 2000

[50] PEYMAN, A. and GABRIEL, C. Tissue equivalent liquids for SAR measurement at microwave frequencies. *Bioelectromagnetics Society 24th Annual Meeting*, Quebec, Canada, June 2002, poster P-53

[51] POKOVIC, K. *Advanced Electromagnetic Probes for Near Field Evaluation*. Doc. Tech. Sci. Diss. ETH Nr. 13334. Switzerland, Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1999

[52] POKOVIC, K., SCHMID, T. and KUSTER, N. Robust setup for precise calibration of E-field probes in tissue simulating liquids at mobile communication frequencies. In *Proceedings ICECOM'97*. Dubrovnik, Croatia, Oct. 12—17, 1997, pp. 120—124

[53] POKOVIC, K., SCHMID, T., CHRIST, A. and KUSTER, N. Design and characterization of E-field probes for lossy media. Submitted to *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1999

[54] POURNAROPOULOS, C.L. and MISRA, D.K. The co-axial aperture electromagnetic sensor and its application in material characterization. *Meas. Sci. Tech.*, 1997, vol. 8, pp. 1191—1202

[55] PRESS, W.H., FLANNERY, B.P., TEUKOLSKY, S.A. and VETTERLING, W.T. *Numerical Recipes in FORTRAN 77: The Art of Scientific Computing*. New York: Cambridge University Press, 1992

[56] RAMO, S., WHINNERY, J.R. and VAN DUZER, T. *Fields and Waves in Communication Electronics*. New York, Wiley, 1993

[57] SCHMID, T., EGGER O. and KUSTER, N. Automated E-field scanning system for dosimetric assessments. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Jan. 1996, vol. 44, no. 1, pp. 105—113

[58] SCHÖNBORN, F., BURKHARDT, M. and KUSTER, N. The difference of EM energy absorption between adults and children. *Health Phys.*, Feb. 1998, vol. 74, no. 2, pp. 160—168

[59] TAYLOR, J.R. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 2nd ed. Sausalito, CA: University Science Books, 1997

[60] TOROPAINEN, A., VAINIKAINEN, P., and DROSSOS, A. Method for accurate measurement of complex permittivity of tissue equivalent liquids. *Electron. Lett.*, 2000, vol. 36, no. 1, pp. 32—34

[61] UKAS LAB34 *The Expression of Uncertainty in EMC Testing*. Feltham, Middlesex, England: United Kingdom Accreditation Service, 2002

[62] UKAS M3003 — *The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement.* Feltham, Middlesex, England: United Kingdom Accreditation Service, 1997

[63] USTUNER, K.F. and FERRAI, L.A. — Discrete splines and spline filters. *IEEE Trans. Circuits Sys.*, July 1991, vol. 39, no. 7, pp 417—422

[64] VIGNERAS, V. — *Elaboration and characterization of biological tissues equivalent liquids in the frequency range 0.9-3 GHz, final report.* France: PIOM Laboratory, University of Bordeaux, Nov. 2001

[65] VON HIPPEL, A. — *Dielectric Materials and Applications*. Cambridge: MA: MIT Press, 1954

УДК 621.396.93:006.354 ОКС 33.060 Э02

Ключевые слова: беспроводные коммуникационные устройства, радиочастотные электромагнитные поля, воздействие радиочастотных полей на человека, коэффициент удельного поглощения энергии, методы измерений, требования к средствам измерений

Редактор *В. Н. Копысов*
Технический редактор *В. Н. Прусакова*
Корректор *С. В. Смирнова*
Компьютерная верстка *З. И. Мартыновой*

Сдано в набор 10.03.2009. Подписано в печать 13.07.2009. Формат 60×84$^1/_8$. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 9,60. Тираж 173 экз. Зак. 488

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru >@gostinfo. ru
Набрано и отпечатано в Калужской типографии стандартов, 248021 Калуга, ул. Московская, 256.

gost.e-ecolog.ru