Электронный журнал «Техническая акустика»
http://webcenter.ru/~eeaa/ejta/

2 (2002) 12.1–12.10

А. Ягнятинскис, Б. Фикс

Институт Термоизоляции,
Литва, г. Вильнюс– 2600, ул. Линкмяну, 28, e-mail: aljagn@takas.lt

К вопросу декларирования шума, излучаемого техническими средствами

Получена 05.06.2002, опубликована 25.10.2002

В статье анализируется величина погрешности, возникающей при определении корректированного по А уровня звуковой мощности из измерений в полосах частот. Показано, как при измерениях по действующим международным стандартам может возникнуть систематическая погрешность корректированного по А уровня, зависящая от использования октавных или третьоктавных полос частот. Получены формулы, позволяющие оценить величину различий корректированных по А уровней звуковой мощности в зависимости от ширины (октавной или третьоктавной) полосы частот. Лабораторными измерениями серийных бытовых устройств показано, что корректированные по А уровни звуковой мощности, полученные из измерений в октавных полосах частот могут различаться до ±1 дБ от полученных в треть октавных полосах частот.

1. ВВЕДЕНИЕ

Декларирование шума становится новым средством в практике ограничения бытового шума. В настоящее время вступают в силу европейские директивы, которые вместо регламентирования шума требуют в ясной форме представить информацию о гарантированном уровне шума, излучаемого определенным изделием (машина, механизм, бытовая техника). Покупатель сам определяет, какой шумности изделие его устраивает. Декларированный шум должен быть представлен с точностью 1 дБА.

Статья посвящена оценке неточности определения излучаемой акустической мощности — величины, используемой при декларировании. От производителей и поставщиков потенциально шумных изделий информацию об излучаемом шуме требуют декларировать в техническом описании. В соответствующих международном [1] и европейском [2] стандартах сформулированы требования, как рассчитывать декларируемое значение. Наиболее распространенной для декларирования величиной является корректированный по А уровень мощности излучаемого звука $L_{W\mathrm{A}}$, который часто путают с используемым только в специфических случаях средним во времени корректированным по А уровнем давления излучаемого звука $L_{p\mathrm{A}}$ (в ГОСТах он называется уровень звука).

Стандартизовано два способа декларирования шума [1]. Согласно первому способу указывается одно число, являющееся суммой двух величин: измеренного значения

излучаемого шума и неопределенности (погрешности) определения этой величины. По второму способу декларирования эти две величины указываются раздельно. Согласно [3–5] неопределенность измерений устанавливается на основе предположения о нормальном распределении значений измеряемой величины с математическим ожиданием равным ее среднему значению и дисперсией равной квадрату стандартного отклонения. Для разных типов изделий, стандартное отклонение $\sigma_{\text{м}}$, определяется из практики многократных измерений, проведенных в различных лабораториях. При этом уровень значимости (доверительная вероятность) обычно принимается равной 95% [1, 2].

При декларировании излучаемого шума акустическая мощность определяется по методикам, изложенным в серии измерительных стандартов [6–13], основные параметры которых обобщены в табл. 1. Существующие методы измерения звуковой мощности позволяют использовать различное измерительное оборудование в зависимости от испытуемого объекта. В общем случае, для определения характеристик шума конкретного типа изделий, подходят сразу несколько, относящихся к различным степеням точности, стандартов. Как видно из табл. 1, корректированные по А уровни звуковой мощности можно получить непосредственно из измерения уровня звука в условиях поля, параметры которого не зависят от частоты. В условиях частотно-зависимого реверберационного поля корректированные по А уровни звуковой мощности необходимо рассчитывать из результатов измерения в октавных или третьоктавных полосах частот. Однако результаты коррекции по А через уровни, полученные в октавных полосах частот, могут отличаться от получаемых при расчетах из третьоктавных полос.

Целью настоящей работы является оценка величины этих отличий, возникающих независимо от степени точности метода, по которому были определены уровни звукового давления в полосах частот. Здесь не анализируются погрешности, связанные с неопределенностью самих методов измерения характеристик излучаемого шума.

Отметим, что согласно ГОСТ 23941-79 [14], п. 6.3 в паспорте изделия указывается корректированный (корректированный по А) уровень звуковой мощности. При этом он может быть, также как и по стандартам ISO*, рассчитан из октавных или третьоктавных уровней звуковой мощности.

Теоретически нетрудно показать, в каких пределах в общем случае могут не совпадать результаты определения корректированного уровня звуковой мощности, полученного путем расчета через октавные уровни, с результатами его расчета через третьоктавные уровни. Это отличие, например, для широкополосных шумов постоянного типа, имеющих в своем спектре тональные составляющие, может оказаться существенным, а именно, порядка ±1 дБА. Наличие тональных составляющих шума является характерным для многих бытовых устройств, например, холодильников и т. д.

* Действующие международные стандарты ISO в области акустики европейский комитет по стандартизации (CEN) часто без изменений принимает как европейские. Такой европейский стандарт имеет аббревиатуру EN ISO. Члены CEN принимают европейские стандарты национальными, при этом в аббревиатуру добавляется условное обозначение страны, например в Литве стандарт ISO 3744:1994 принят как LST EN ISO 3744:2000, что иногда может запутать пользователей.

Таблица 1. Обзор международных стандартов для определения излучаемой звуковой мощности.

Стандарт	Способ определения корректированного по А уровня мощности, L_{WA}	Точность определения L_{WA} через стандартное отклонение, σ_R, дБ	Среда измерения	Тип шума
ISO 3741 Точный (1 степени)	Рассчитывается через треть октавные полосы частот	$\sigma_R \le 0{,}5$	Реверберационная камера	Постоянный; широкополосный; узкополосный; с дискретным спектром
ISO 3743-1 Технический (2 степени)	Рассчитывается через октавные полосы частот	$\sigma_R \le 1{,}5$	Реверберационное помещение	Постоянный; широкополосный; узкополосный; с дискретным спектром
ISO 3743-2 Технический (2 степени)	Непосредственно измеряется	$\sigma_R \le 2{,}0$	Специальное реверберационное помещение	Постоянный; широкополосный; узкополосный; с дискретным спектром
ISO 3744 Технический (2 степени)	Рассчитывается через треть октавные или октавные полосы частот	$\sigma_R \le 1{,}5$*	На измерительной поверхности в условиях почти свободного поля	Любой
ISO 3745 Точный (1 степени)	Непосредственно измеряется	$\sigma_R \le 1{,}0$**	На измерительной поверхности в заглушенной камере	Любой
Проект ISO 3745		$\sigma_R \le 0{,}5$		
ISO 3746 Ориентировочный (3 степени)	Непосредственно измеряется	$\sigma_R \le 3{,}0$*…5,0 в зависимости от условий измерения	На измерительной поверхности в натурных условиях	Любой
ISO 3747 Технический (2 степени)	Непосредственно измеряется или рассчитывается через октавные полосы частот	$\sigma_R \le 1{,}5$	В условиях существенно отраженного звука с использованием образцового источника шума	Постоянный; широкополосный; узкополосный; с дискретным спектром
ISO 3747 Ориентировочный (3 степени)		$\sigma_R \le 4{,}5$		

* Оценки даны для сигналов с относительно плоским спектром.

** Указано в ISO 3744, таблица 0.1

Декларирование излучаемого шума возложено на производителей изделий, которые имеют возможность, в зависимости от типа продукции, применять различные методы определения шумовых характеристик. При этом нет жесткой регламентации что применять для расчета корректированных по А уровней: октавные уровни как определено в ISO 3743-1, ISO 3744, ISO 3747 или треть октавные уровни (ISO 3741, ISO 3744). Как показано далее, в некоторых случаях замена метода измерения дает возможность, в пределах 1 дБ уменьшить декларируемую величину.

Покажем, какой величины может быть отличие в определении корректированных по А уровней звуковой мощности.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Расчет корректированного уровня звуковой мощности через значения в третьоктавных полосах частот, $L_{W\text{A},1/3}$, осуществляется по следующей формуле [7]:

$$L_{W\text{A},1/3} = 10\lg\sum_{j=1}^{N} 10^{0,1(L_{Wj}+C_j)}\ , \tag{1}$$

где L_{Wj} — уровень мощности звука в j-й третьоктавной полосе частот (дБ); C_j — коэффициент коррекции по А в j-й третьоктавной полосе частот [7]; N — число третьоктавных полос частот в диапазоне измерения.

Расчет корректированного уровня мощности звука через значения в октавных полосах частот, $L_{W\text{A},1}$, осуществляется по аналогичной формуле, но с другими значениями N и C_j [7]. Хотя октаву составляют три третьоктавные полосы частот, коэффициенты коррекции по А для октавных полос частот равны коэффициенту коррекции по А в средней третьоктавной полосе данной октавы. На самом деле октавные уровни, $L_{Wj,1}$, связаны с входящими в ту же октаву третьоктавными уровнями, $L_{Wj,1/3}$, формулой

$$L_{Wi,1} = 10\lg\sum_{j=3i-2}^{3i} 10^{0,1L_{Wj,1/3}}\ , \tag{2}$$

Можно показать, что расчет $L_{W\text{A},1}$ через октавные полосы частот осуществляется через те же параметры N и C_j, используемые при расчете через третьоктавные полосы частот, по формуле

$$L_{W\text{A},1} = 10\lg\sum_{j=1}^{N} 10^{0,1(L_{Wj}+C_{j,1})}\ , \tag{3}$$

где $C_{j,1} = C_k$, а индекс k определяется соотношением $k = 3\left[\frac{j-1}{3}\right]+2$, здесь […] — целая часть числа.

Исследуемая разность $\Delta L_{W\text{A}} = L_{W\text{A},1/3} - L_{W\text{A},1}$ зависит от уровня мощности звука L_{Wj} в каждой из N третьоктавных полос частот. Оценку величины $\Delta L_{W\text{A}}$, зависящую от N

параметров, сведем к одному параметру следующим образом. Рассмотрим простейший случай, когда тональная составляющая со значением уровня L_{Wj} попадает только в одну j-ю третьоктавную полосу и отличается от постоянного уровня L в остальных полосах. В этом случае, после преобразований, разность ΔL_j приобретает следующий вид:

$$\Delta L_j = 10\lg\left[\frac{10^{0,1(\Delta_j + C_j)} + \left[\sum_{i=1}^{j-1} + \sum_{i=j+1}^{N}\right](10^{0,1C_i})}{10^{0,1(\Delta_j + C_{j,1})} + \left[\sum_{i=1}^{j-1} + \sum_{i=j+1}^{N}\right](10^{0,1C_{i,1}})}\right], \quad (4)$$

где $\Delta_j = L_{Wj} - L$.

Как видим, разность ΔL_j зависит только от одного параметра Δ_j, т. е. от величины превышения тонального уровня L_{Wj} в j-й полосе над уровнем L в остальных полосах. Для примера в табл. 2 представлены, полученные из формулы (4) значения ΔL_j для случаев, когда $\Delta_j = 10$ дБ.

Таблица 2. Значения разностей ΔL_j, дБ, для случая, когда уровень шума только в одной из третьоктавных полос отличается от уровня в остальных полосах на 10 дБ.

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
f, Гц	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
ΔL_j	-0,06	-0,03	0,03	-0,16	-0,02	0,17	-0, 33	-0,02	0,31	-0,30	-0,02
j	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
f, Гц	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	
ΔL_j	0,22	-0,10	-0,01	0,03	0,07	-0,01	-0,22	0,33	-0,02	-0,42	

Из табл. 2 видно, что в зависимости от номера третьоктавной полосы частот, содержащей тональную составляющую, величина ΔL_j может быть как положительной (j = 6, 9, 12, 19), так и отрицательной (j = 4, 7, 10, 18, 21). Для анализа общего случая используем смоделированные примеры.

3. ПРИМЕРЫ

Данные табл. 2 позволяют смоделировать такие спектры звука L_{Wj}, при которых корректированные по А уровни, рассчитанные из октавных ($L_{WA,1}$) и третьоктавных значений ($L_{WA,1/3}$), имеют наибольшее отличие при заданном $\Delta_j = 10$ дБ. Этого можно достигнуть, увеличив одновременно на 10 дБ, относительно, например, постоянного уровня в 30 дБ, уровни в третьоктавных полосах 315, 630, 1250 и 6300 Гц или, аналогично, на 10 дБ увеличив одновременно уровни в других третьоктавных полосах

200, 400, 800, 5000 и 10000 Гц. На рис. 1 представлены такие спектры. Рассчитанные корректированные по А уровни звуковой мощности для случая изображенного на рис. 1a составляют $L_{WA,1/3} = 46{,}2$ дБ и $L_{WA,1} = 45{,}6$ дБ, а для случая изображенного на рис. 1b — $L_{WA,1/3} = 46{,}2$ дБ и $L_{WA,1} = 46{,}8$ дБ. Все данные округлены с точностью до 0,1 дБ. Заметим, что для идеально плоской характеристики (без тональных составляющих) эти значения практически совпадают. Если Δ_j возрастет с 10 до 15 дБ, то отличие между $L_{WA,1/3}$ и $L_{WA,1}$ для звуковых спектров представленных на рис. 1 увеличится с 0,6 дБ до 0,8 дБ. На рис. 2 показано изменение возможного максимального отличия ΔL_{WA} между корректированными уровнями $L_{WA,1/3}$ и $L_{WA,1}$ в зависимости от величины Δ_j для спектров звука изображенных на рис. 1.

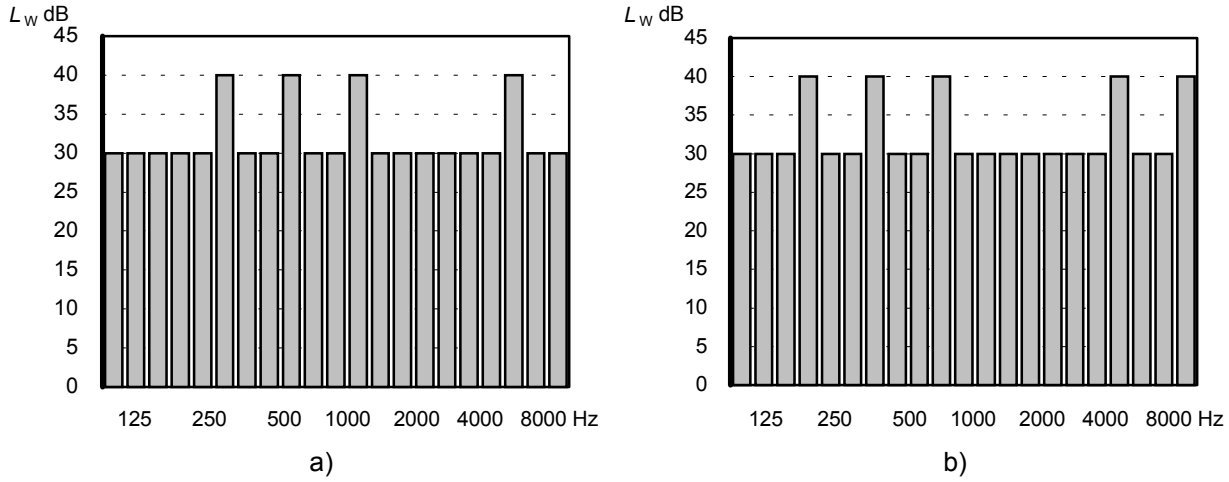

Рис. 1. Смоделированные треть октавные уровни звуковой мощности

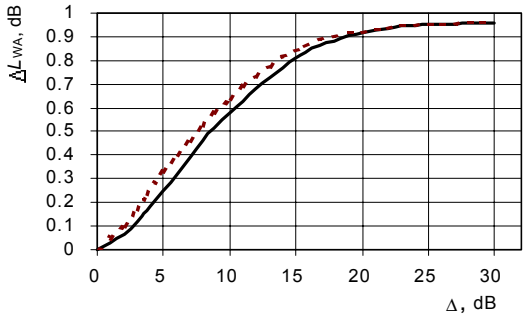

Рис. 2. Зависимости абсолютных значений возможных отличий ΔL_{WA} от величины $\Delta_j = \Delta$. *Сплошная линия* — для спектров звуковой мощности изображенных на рис. 1a (здесь ΔL_{WA} имеют положительные значения), *пунктирная линия* — для спектров звуковой мощности изображенных на рис. 1b (здесь ΔL_{WA} имеют отрицательные значения)

Из графика на рис. 2 следует, что значения корректированного по А уровня мощности звука $L_{WA,1}$, рассчитанного из октавных уровней, могут отличаться от значений корректированного по А уровня мощности звука $L_{WA,1/3}$, рассчитанного из третьоктавных уровней, на величину до $\pm 1{,}0$ дБ. При округлении согласно требованиям декларирования до целого числа, даже небольшая погрешность результата

в ± 0,2 дБА может привести к скачку на 1 дБА. Такая систематическая погрешность может возникнуть при тональной составляющей в 5 дБ. По определению шум считается тональным, если уровни в третьоктавной полосе частот превышает уровень в соседних полосах не менее чем на 10 дБ, при этом, как видно из рис. 2, погрешность может быть порядка ± 0,6 дБА.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Теоретически полученные результаты проверялись лабораторными измерениями. Объектом испытаний являлась партия бытовых холодильников Snaigė C290.0 с компрессором GL-40-AA, для которых определялся корректированный по А уровень звуковой мощности. Измерения проводились по стандарту [7] в аккредитированной для таких испытаний реверберационной камере объемом 202 м^3 в диапазоне частот от 100 Гц до 10 кГц. Реверберационная характеристика камеры с образцом приведена на рис. 3. Зависимость времени реверберации от частоты доказывает, что корректированный по А уровень не может быть определен непосредственными измерениями.

Так как работа холодильника имеет циклический характер, для регистрации шума использовался метод мониторинга, т. е. спектр шума в камере регистрировался каждую секунду в течении 8 часов поочередно тремя микрофонами, расположенными в трех различных точках камеры. Уровень звукового давления измерялся микрофоном, соединенным через мультиплексор с анализатором звука, и через плату сопряжения передавался в персональный компьютер.

Полученные результаты затем обрабатывались специальной программой, с помощью которой вычислялись интегрированные спектры звукового давления за стандартизированный период работы холодильника. Временная зависимость регистрируемого уровня звука приведена на рис. 4.

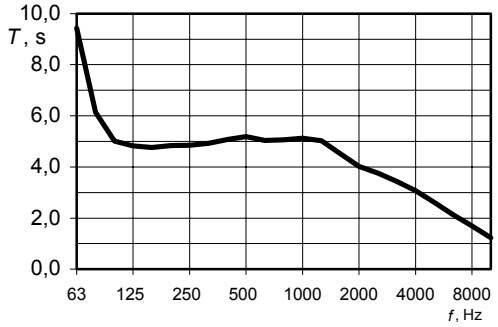

Рис. 3. Время реверберации в реверберационной камере

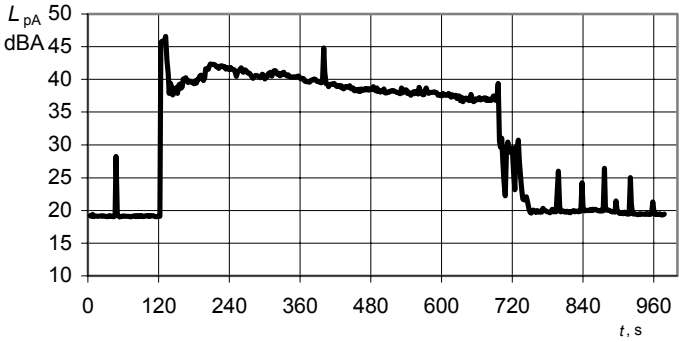

Рис. 4. Временная зависимость уровней звука холодильника С 290 за один цикл его работы

Спектр мощности L_W вычислялся по усредненному во времени и пространстве спектру звукового давления на основе следующей формулы [7]:

$$L_W = \overline{L_p} + \left\{ 10\lg\frac{A_{\text{экв}}}{A_0} + 4{,}34\frac{A_{\text{экв}}}{S} + 10\lg\left(1+\frac{S\,c}{8\,Vf}\right) - 10\lg\left[\frac{427}{400}\sqrt{\frac{273}{273+\theta}}\,\frac{B}{B_0}\right] - 6 \right\}, \text{ дБ}, \qquad (5)$$

где $\overline{L_p}$ — средний уровень звукового давления в камере (дБ); $A_{\text{экв}}$ — эквивалентная площадь поглощения реверберационной камеры (м^2); $A_0 = 1$ м^2; S — общая площадь поверхности реверберационной камеры (м^2); V — объем реверберационной камеры (м^3); f — средняя частота третьоктавной полосы частот измерений (Гц); c — скорость звука при температуре θ, $c = 20{,}05\sqrt{273+\theta}$, (м/с); θ — температура (°С); B — атмосферное давление (Па); $B_0 = 1{,}013\times10^5$ Па.

При этом эквивалентная площадь поглощения реверберационной камеры, $A_{\text{экв}}$, определяется в каждой третьоктавной полосе частот через время реверберации, T_{rev}, в секундах согласно формуле Сабина:

$$A_{\text{экв}} = \frac{55{,}26}{c}\left(\frac{V}{T_{\text{rev}}}\right). \qquad (6)$$

Для целей декларирования в трех разных местах камеры поочередно измерялись шумы трех однотипных изделий. Определенный на основе (5)–(6) уровень звуковой мощности шума в третьоктавных полосах частот для одного из изделий приведен на рис. 5. Рассчитанные корректированные по А уровни шума для всех изделий, а также результаты декларирования сведены в табл. 3. В табл. 3 значения неопределенности рассчитаны согласно [2], для случая трех изделий и доверительной вероятности равной 95%.

Таблица 3. Результаты экспериментального определения декларированного значения шума холодильника С 290

Полоса частот 100-10000 Гц	L_{WA} (дБ)			Среднее значение (дБ)	Неопреде-ленность (дБ)	Декларируе-мое значение (дБ)
	изделие I	изделие II	изделие III			
1/3 октава	39,6	37,8	38,5	38,6	2,7	**41**
1/1 октава	40,2	38,6	38,6	39,1	2,7	**42**

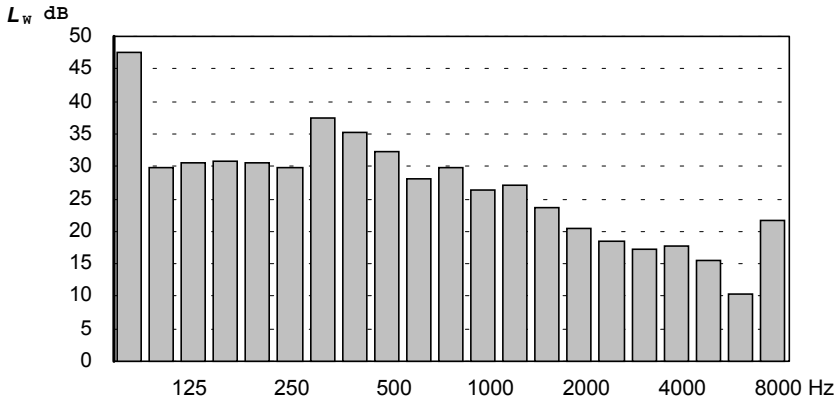

Рис. 5. Определенные согласно стандарта третьоктавные уровни мощности шума бытового холодильника С 290

5. ВЫВОДЫ

Декларирование шума устройств является средством объективного информирования потребителей об излучаемом шуме. Используемая в этих целях корректированная звуковая мощность не измеряется непосредственно, а рассчитывается по результатам измерения уровня звукового давления как в октавных, так и в третьоктавных полосах частот. В работе показано как при измерениях по действующим международным стандартам может возникнуть систематическая погрешность пересчета результатов, полученных в полосах частот, в корректированные по А уровни.

Полученные соотношения, подтвержденные экспериментальными данными, позволяют по спектру шума оценить величину различий корректированных по А уровней звуковой мощности в зависимости от ширины (октавной или третьоктавной) полосы частот, используемой для расчетов.

Для реальных бытовых устройств (холодильников), излучающих постоянный шум с тональными составляющими, показано, что корректированные по А уровни звуковой мощности, полученные из измерений в октавных полосах частот могут отличаться от уровней, полученных в третьоктавных полосах частот, на величину до ±1 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 4871:1996, Acoustics — Declaration and verification of noise emission values of machinery and equipment.
2. EN 60704-3:1994, Test code for the determination of airborne acoustical noise emitted by household and similar electrical appliances — Part 3: Procedure for determining and verifying declared noise emission values.
3. ISO 7574-1:1985, Acoustics — Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment — Part 1: General considerations and definitions.
4. ISO 7574-2:1985, Acoustics — Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment — Part 2: Methods for stated values for individual machines.
5. ISO 7574-4:1985, Acoustics — Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment — Part 4: Methods for stated values for batches of machines.
6. ISO 3740:2000, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Guidelines for the use of basic standards.
7. ISO 3741:1999, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for broad-band sources in reverberation room.
8. ISO 3743-1:1994, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields — Part 1: Comparison method for hard-walled test rooms.
9. ISO 3743-2:1994, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields — Part 2: Methods for special reverberation test rooms.
10. ISO 3744:1994, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane.
11. ISO 3745:1983, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms.
12. ISO 3746:1995, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Survey method.
13. ISO 3747:2000, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Survey method using a reference sound source.
14. ГОСТ 23941-79 Шум. Методы определения шумовых характеристик. Общие требования.