АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 1, с. 123 - 133

УДК 534.843.242.6;534.6.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ РУПОРОВ И ВОЗДУХООТВОДЯЩИХ УСТРОЙСТВ В ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ РЕВЕРБЕРАЦИОННЫХ КАМЕРАХ

© 1996 г. А. Г. Семенов*, В. В. Шейко**

**Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН*
117036 Москва, ул. Шверника, 4

***Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского*
140160 Жуковский-3, Московская обл.

Поступила в редакцию 18.10.94 г.

В работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований и расчетных оценок характеристик звукопоглощения рупоров и воздухоотводящих устройств, используемых в специальных испытательных реверберационных камерах для имитации в стендовых условиях акустических нагрузок, создаваемых при старте и полете современных летательных аппаратов. Результаты могут быть использованы для разработки и эксплуатации современных реверберационных испытательных камер.

В связи со значительным ростом за последние десятилетия мощности двигательных установок и скорости современных летательных аппаратов (ЛА) в ряде случаев акустические нагрузки, возникающие при их эксплуатации, превратились в фактор, ограничивающий в значительной степени надежность ЛА, а следовательно и их технические возможности. Испытания ЛА в целом или их отдельных конструкций на акустическое воздействие в стендовых условиях, наряду с другими видами испытаний, стали в последнее время одним из основных этапов разработки авиационно-космической техники, требующим значительных энергетических и финансовых затрат. Самым экономичным и удобным способом имитации высокоинтенсивных акустических нагрузок являются, как известно, реверберационные камеры высокого уровня (РКВУ) [1]. Они представляют собой весьма сложные устройства, снабженные, кроме набора мощных, как правило, шумовых источников звука, призванных создать в объеме камеры интенсивное акустическое поле в заданном диапазоне частот, также и набором акустических согласующих устройств (рупоров) для ввода акустической энергии в объем камеры. Использование источников звука без рупоров, хотя и допускается в ряде случаев [1], например, для создания дополнительных местных нагрузок на испытуемый объект, оказывается весьма нецелесообразным ввиду неприемлемых потерь энергии вблизи от источника, объясняемых плохим согласованием его импеданса со средой – невыгодным соотношением фаз между переменным давлением и колебательной скоростью – особенно в низкочастотном диапазоне. В подобных устройствах обычно акустическая энергия генерируется газодинамическими сиренами – единственными источниками, способными обеспечить создание достаточно высоких уровней звукового давления с разумной эффективностью (до 20 - 30 процентов). Поскольку эти источники действуют на основе модуляции значительных потоков воздуха (до нескольких десятков килограмм воздуха, сжатого до 6 - 10 атмосфер в секунду), то, очевидно, одновременно с акустической энергией в объем камеры будет постоянно вводиться еще более значительная пневматическая энергия. Таким образом, даже если принять в расчет неизбежные потери энергии в объеме камеры, в РКВУ появляется потребность отвода и гашения значительных по величине остатков пневматической и акустической энергии, что обеспечивается системой снабженных шумоглушителями воздухоотводящих устройств через специальные технологические отверстия. Как будет показано, поглощение звуковой энергии этими устройствами, вообще говоря, не сводится к поглощению звука лишь их оконечными отверстиями, расположенными на стенах камеры, хотя последнее может служить в качестве предварительной исходной оценки. Так, например, значительные по размерам согласующие устройства, в особенности предназначенные для низкочастотной части рабочего диапазона камеры, образуют внутри нее, по существу, систему связанных объемов, в которых при оценке звукопоглощения приходится учитывать не только спектр из собственных частот, но и площадь дополнительных, присоединенных к объему камеры, поглощающих стен. Чтобы представить себе роль этих факторов в

общем балансе звукопоглощения внутренних поверхностей РВКУ, непосредственно определяющем энергетические затраты на создание заданного акустического поля в камере, следует заметить, что в совокупности их величина по предварительным оценкам сравнима, а в ряде спектральных частотных полос может даже превосходить суммарное звукопоглощение внутренних стен камеры без указанных устройств и, таким образом, вносит существенный, а во многих случаях определяющий вклад в прогнозируемые затраты акустической энергии источников.

Целью данной работы является исследование характеристик звукопоглощения согласующих устройств (рупоров) и воздухоотводящих устройств в РКВУ в объеме, необходимом для оценки их влияния на такие характеристики камер, как допустимый частотный диапазон испытаний, время реверберации звука, спектральный и интегральный уровни звукового давления, достижимые в зоне расположения испытуемых конструкций, и акустическая мощность, потребная для их реализации. Исследования поглощения звука рупорами и технологическими отверстиями различной формы были начаты авторами в конце 70-х - начале 80-х годов в связи с разработкой РКВУ объемом 1500 м^3 для испытаний агрегатов отечественного многоразового воздушно-космического самолета.

При решении одной из главных задач исследования – минимизации общей площади выходных отверстий согласующих устройств на стенках камеры, приходится учитывать два обстоятельства. С одной стороны, их размеры должны быть весьма значительными – одного порядка с длиной волны низкочастотной границы спектра [1 - 3], с другой стороны, можно показать, что при необходимости реализации в объеме камеры достаточно интенсивного (с уровнем звукового давления – УЗД – порядка 160 - 170 дБ) широкополосного (с шириной диапазона порядка нескольких октав) спектра акустических нагрузок естественная попытка обойтись одним рупором на весь частотный диапазон оказывается нереальной из-за нелинейных потерь энергии при ее передаче от мощного источника, расположенного в горловине рупора, к устью [1, 4]. Плотность энергии в горловине для указанных выше условий оказывается так велика, что, по имеющимся данным, в том числе данным авторов [1, 2, 4], наблюдаемые потери практически исключают создание сколько-нибудь эффективных (экспоненциальных) рупоров для диапазона частот шире чем 1.0 - 1.5 октавы. Возможное снижение этого вида потерь за счет уменьшения мощности отдельных источников с одновременным увеличением числа одинаковых рупоров также оказывается неприемлемым из-за резкого возрастания площади выходных отверстий и, соответственно, поглощающей способности камеры. При этом, в свою очередь, потери энергии в объеме камеры возрастают таким образом, что достигнутая за счет снижения нелинейных потерь экономия оказывается незначительной.

В целом, при заданных частотном и динамическом диапазонах камеры, максимальном и среднем УЗД и расходах воздуха, а также требований к параметрам используемых источников, материалу и основным акустическим характеристикам внутренних стен камеры задача определения оптимального числа и размеров согласующих устройств и воздухоотводящих трактов может быть решена [3] с использованием изложенных выше принципов. Единственным отсутствующим элементом предлагаемой процедуры решения является адекватный способ оценки звукопоглощающей способности согласующих и технологических устройств РКВУ, предназначенных для подвода и отвода акустической энергии, разработке которого и посвящена данная работа. В виду известной конструктивной сложности устройств, работающих в присутствии заметных течений воздуха, способ оценки, в принципе, не может быть реализован чисто аналитически – путем расчета и поэтому в теоретическом плане мы ограничимся лишь заключительными замечаниями, указывающими место полученных результатов по отношению к ранее известным. Основным же методом исследования будет экспериментальный, основанный на измерении спектральных параметров звукопоглощения отдельных устройств на модели РКВУ (М 1 : 10) в сравнении со звукопоглощением модели камеры без этих устройств в импульсном (с оценкой времени реверберации) и непрерывном (с регистрацией УЗД в камере, генерируемого с использованием маломощных источников с управляемым спектром) режимах, а также в сравнении с соответствующими известными аналитическими зависимостями. Поправки к полученным результатам, связанные с присутствием в натурной РКВУ газодинамических течений и, частично, с "масштабным" фактором изучались отдельно при отработке конструкции и испытаниях источников звука в газодинамической трубе бегущей волны [1, 4], а также при пусконаладочных испытаниях РКВУ-1500 [1, 3] и в данной работе не излагаются.

Основной объем экспериментальных исследований поглощения звука рупорами и технологическими отверстиями различной формы был выполнен авторами на уменьшенной модели РКВУ (М 1 : 10) с геометрическими размерами ($l_x = 0.92$ м, $l_y = 1.15$ м, $l_z = 1.47$ м). Боковые стенки, пол и потолок модели камеры были изготовлены из листовой стали толщиной (δ) 20 мм и жестко скреплены винтами. Верхняя крышка камеры выполнена съемной, а на боковых стенках предусмотрены окна из органического стекла ($\delta = 20$ мм).

Рис. 1. Структурная схема стенда для измерения времени реверберации.

Внутри камеры смонтировано координатное устройство, представляющее собой телескопическую штангу, закрепленную шарнирно в одной из стенок камеры. Шарнир снабжен стаканом с нониусом для определения угла наклона штанги, а на самой штанге по всей ее длине нанесена соответствующая разметка (мм), что позволяет фиксировать измерительный микрофон в заданных точках объема модели камеры. Для изменения угла ориентации микрофона в точке измерения штанга снабжена специальными торсионами, обеспечивающими поворот микрофона относительно штанги. Кроме этого, на крышке камеры установлено дополнительное координатное устройство, выполненное в виде шарнира и штанги с гибким валом, на котором закреплен дублирующий микрофон. В качестве широкополосных источников звука использовались громкоговорители 25ГД-26. Измерения акустических параметров проводились с помощью специального стенда, схематически изображенного на рис. 1, смонтированного из приборов фирмы "Robotron" и состоящего функционально из двух трактов – задающего и измерительного.

В состав задающего тракта входили: генератор шума 03.004, 1/3-октавный фильтр 01.018, двухканальный переключатель 04.002, усилитель мощности и универсальный цифровой вольтметр.

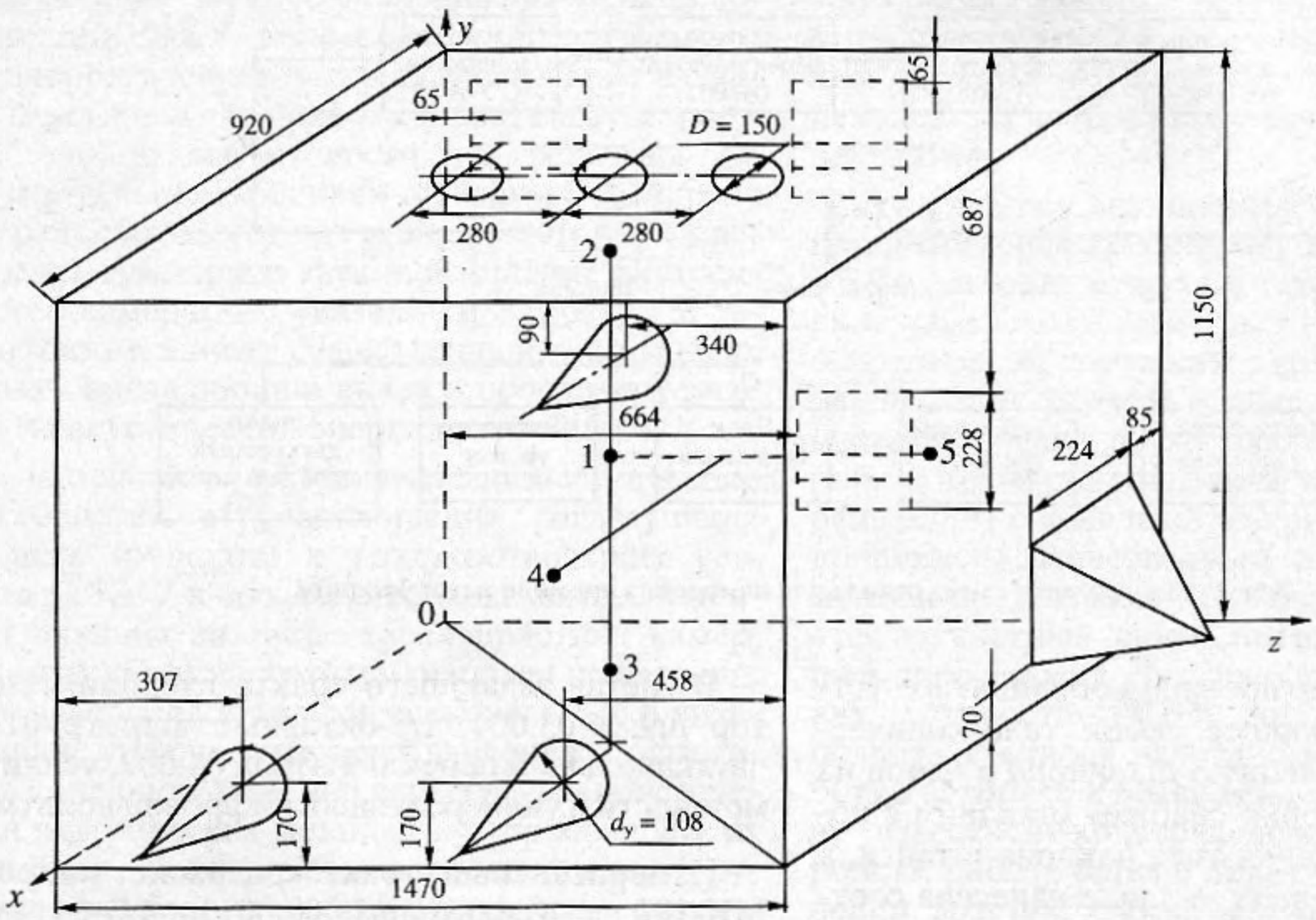
Измерительный тракт содержал: микрофон МК-102 с усилителем 00.0011, 1/3-октавный фильтр 01.018, самописец уровня 02.013, блок индикации 02.022 и аналого-цифровой преобразователь 52.003.

К преимуществам предлагаемых схем структурного построения трактов следует отнести присутствие в обоих схемах одинаковых 1/3-октавных фильтров, позволяющих обеспечить контролируемое возбуждение звукового поля, в том числе в импульсном режиме, фиксацию его максимального и среднего уровня, а также закономерностей спада уровня звука в исследуемых 1/3-октавных полосах частот.

Расположение источников звука, согласующих и технологических устройств и их отверстий на стенках модели, а также точек установки измерительных микрофонов в объеме камеры показано на рис. 2, а расположение отверстий и рупоров

Таблица 1

Расположение технологических отверстий и рупоров															Камера без отверстий и рупоров
на стенах камеры												на потолочном перекрытии			
размеры отверстий (мм)							рупоры с квадратным устьем		рупоры с круглым устьем			круглые отверстия			
114 × 228			57 × 228			228 × 228	размеры устья 210 × 210 мм		диаметр устья d_y = 108 мм			диаметр D = 150 мм			
площадь отверстий (м^2)							площадь устья		площадь			площадь			
0.026			0.013			0.052	S_{y_1} = 0.0441 м^2		S_{y_2} = 0.0092 м^2			0.0177 м^2			
количество							количество рупоров		количество рупоров			количество отверстий			
1	2	3	1	2	3	4	3		1	2	3	1	2	3	



N	x	y	z
1	46	57.5	73.5
2	46	99	69
3	46	16	69
4	90	57.5	97
5	46	57.5	136

Рис. 2. Расположение рупоров и отверстий.

на стенках модели камеры и их размеры представлены в табл. 1.

Типовая уровнеграмма спада сигнала в модели РКВУ, используемая для определения характерного времени реверберационного затухания звука, представлена на рис. 3. На начальном участке уровень сигнала изменяется по случайному закону и может быть охарактеризован лишь средним значением (уровнем), в дальнейшем фиксируется участок спада сигнала, который и подвергается обработке. В соответствии с международным стандартом T_{iso} 3382 ход уровнеграммы на рис. 3 аппроксимировался прямой, проходящей через точки уровнеграммы, соответствующие спаду уровня звукового поля (давления) на 5 дБ и 35 дБ относительно среднего уровня. Для определения времени реверберации при этом использовался специальный шаблон, а соответствующие расчеты энергетических параметров затухания проводились по стандартной методике [7]. Для каждой третьоктавной частотной полосы усредненные по количеству точек измерения (N), время реверберации $T_{iso}^{ср}$ и полное поглощение рупора (A_p) или отверстия (A_o) в объеме камеры (V) определялись как среднеарифметические величины:

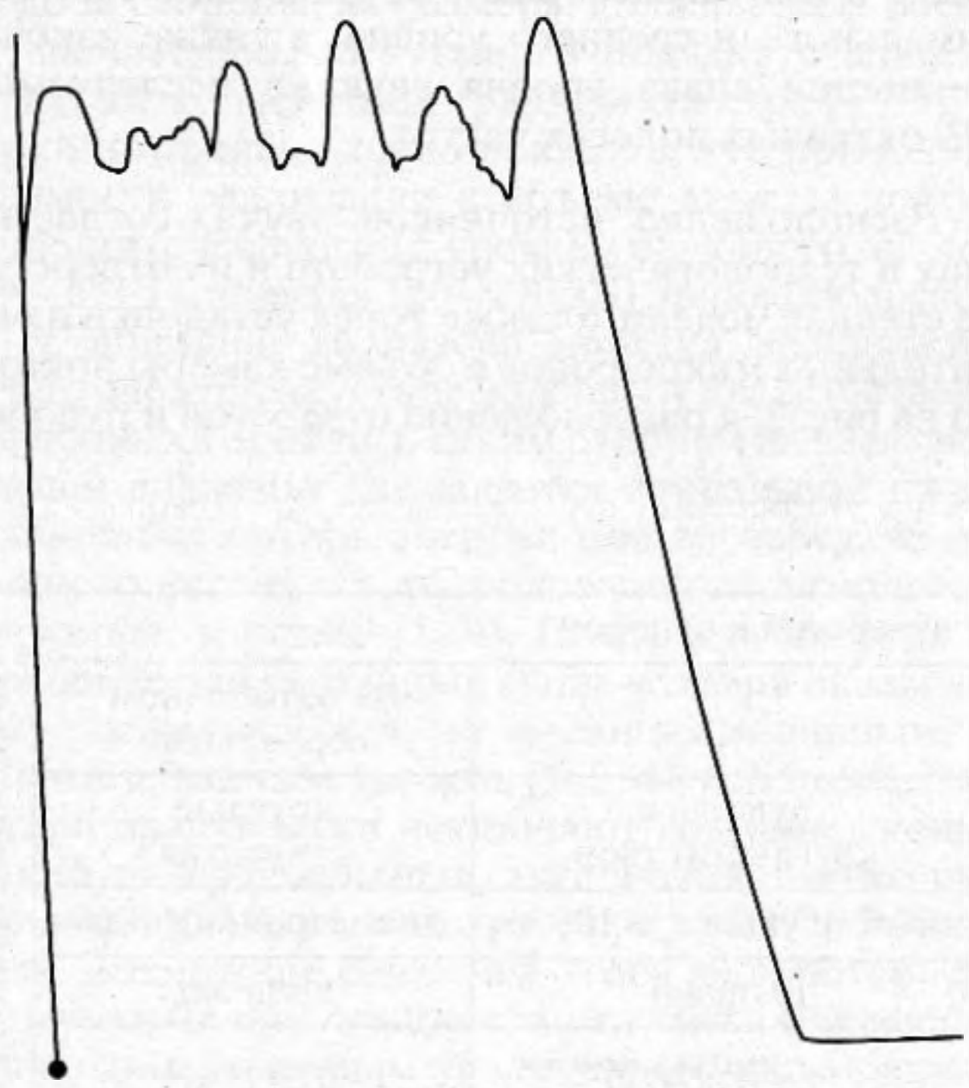


Рис. 3. Типовая уровнеграмма для определения времени реверберационного затухания (f = 160 Гц, усиление 80).

$$T_{iso}^{ср} = N^{-1}\sum_{i=1}^{N} T_i, \quad A_p = 0.161\,VN^{-1}\sum_{i=1}^{N} T_i^{-1}.$$

При этом для сравнения и нормировки проводились также измерения поглощения звука в модели камеры без рупоров и отверстий (устья рупоров и отверстия закрыты специальными крышками), с каждым рупором или отверстием отдельно, а также в различных комбинациях (табл. 1), а соответствующие значения коэффициентов

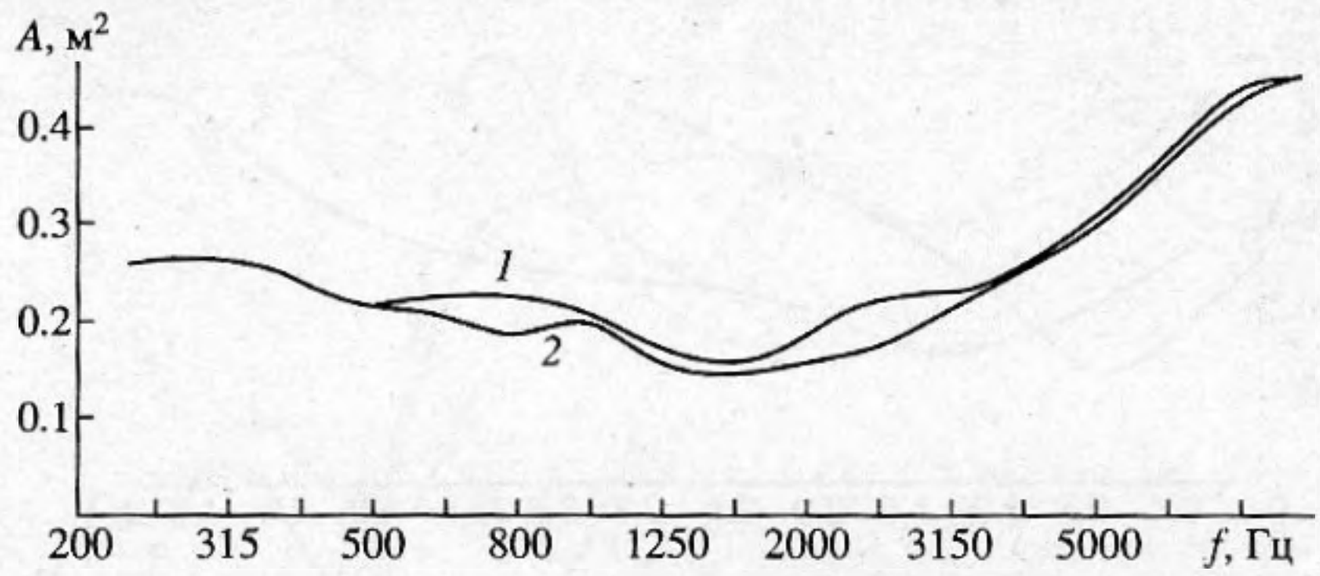


Рис. 4. Поглощение звука рупорами, *1* – рупор с квадратным устьем, *2* – рупор с круглым устьем.

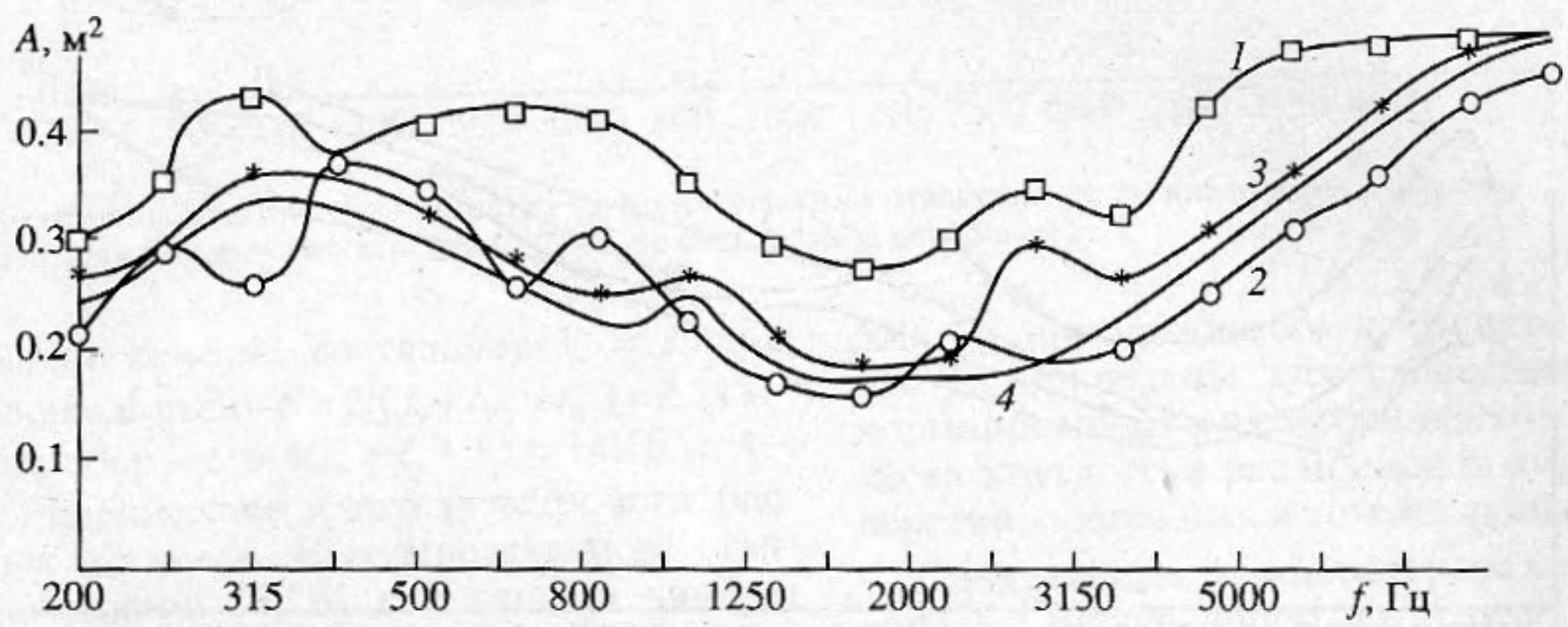


Рис. 5. Поглощение звука технологическими отверстиями, *1* – квадратное отверстие, *2* – круглое отверстие, *3* – прямоугольное отверстие 1 : 2, *4* – прямоугольное отверстие 1 : 4.

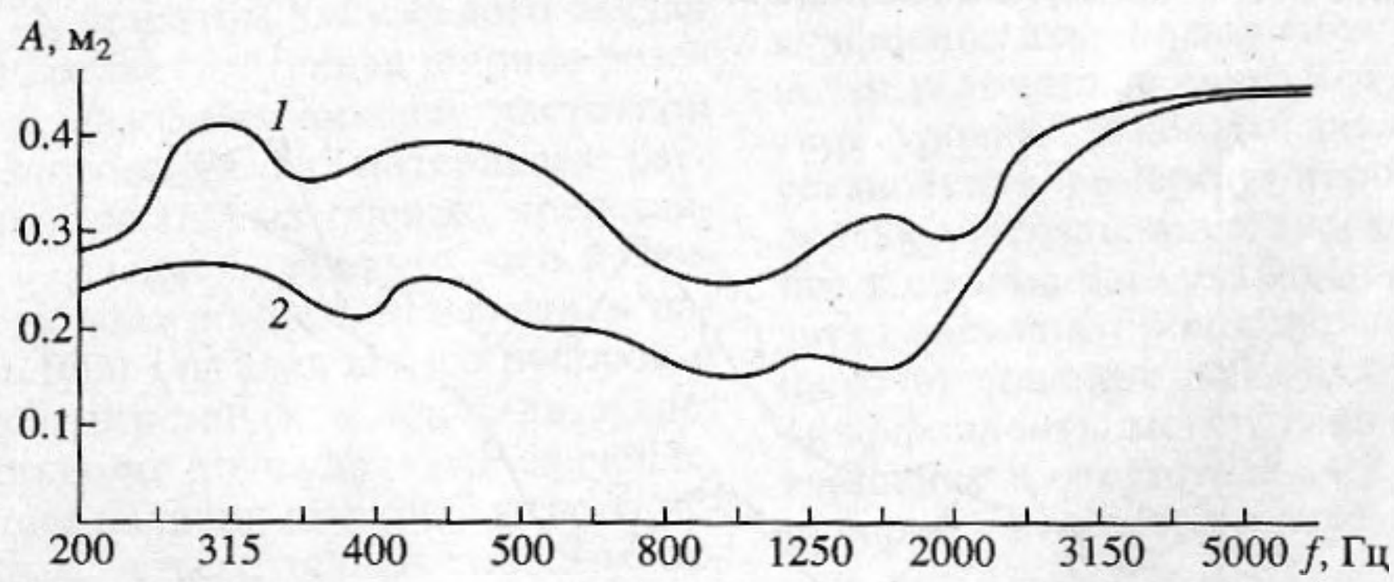


Рис. 6. Поглощение звука отверстием и рупором, *1* – квадратное отверстие, *2* – рупор с квадратным устьем.

поглощения для каждого элемента качественно определялись путем нормировки прироста полученного значения общего поглощения на площадь элемента (рупора или отверстия). Зависимости измеренных значений поглощения звука рупорами и отверстиями от безразмерных параметров (d/λ), где d – наибольший линейный размер устья рупора или отверстия (диагональ квадрата или диаметр круга), λ – длина звуковой волны, соответствующая средней частоте 1/3-октавной полосы, для которой приводится данное значение поглощения, показаны на рис. 4 - 8, а зависимости соответствующих нормированных коэффициентов поглощения от этих параметров – на рис. 9, 10. Следует отметить, что в частотном диапазоне 315 - 3150 Гц величина общего поглощения звука рупором с квадратным устьем оказывается в 1.4 - 1.5 раз меньше величины поглощения звука квадратным отверстием той же площади – рис. 6, что может быть объяснено очевидным различием конструкции этих элементов – рис. 2. Среднечастотный рупор с круглым устьем имеет на 20 - 25% меньшее общее поглощение, чем низкочастотный рупор с квадратным устьем – рис. 4, что может быть объяснено очевидным различием активной поглощающей площади этих элементов.

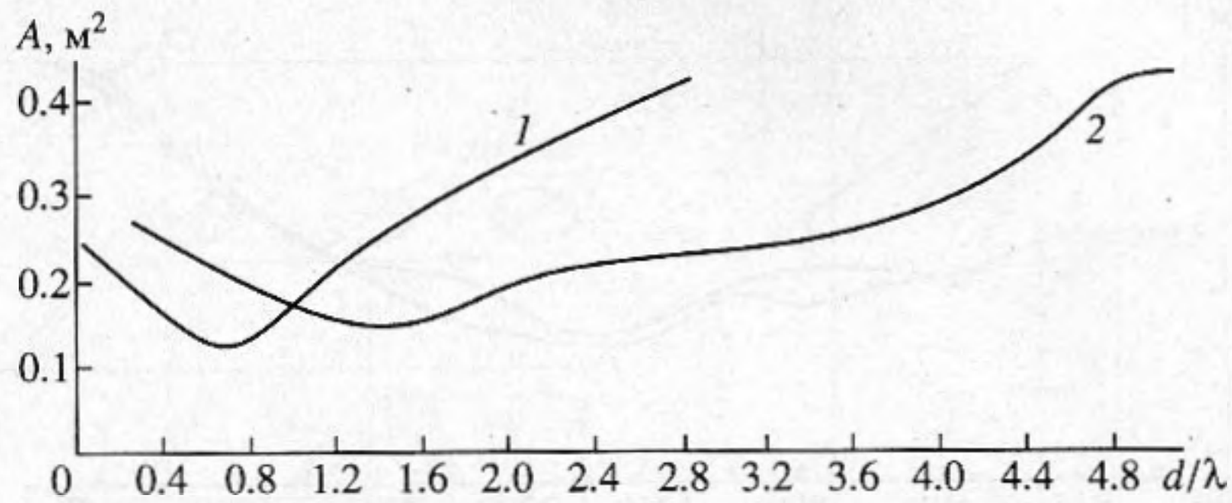


Рис. 7. Поглощение звука рупорами, *1* – круглое устье $d = 108$ мм, *2* – квадратное устье 210×210 мм.

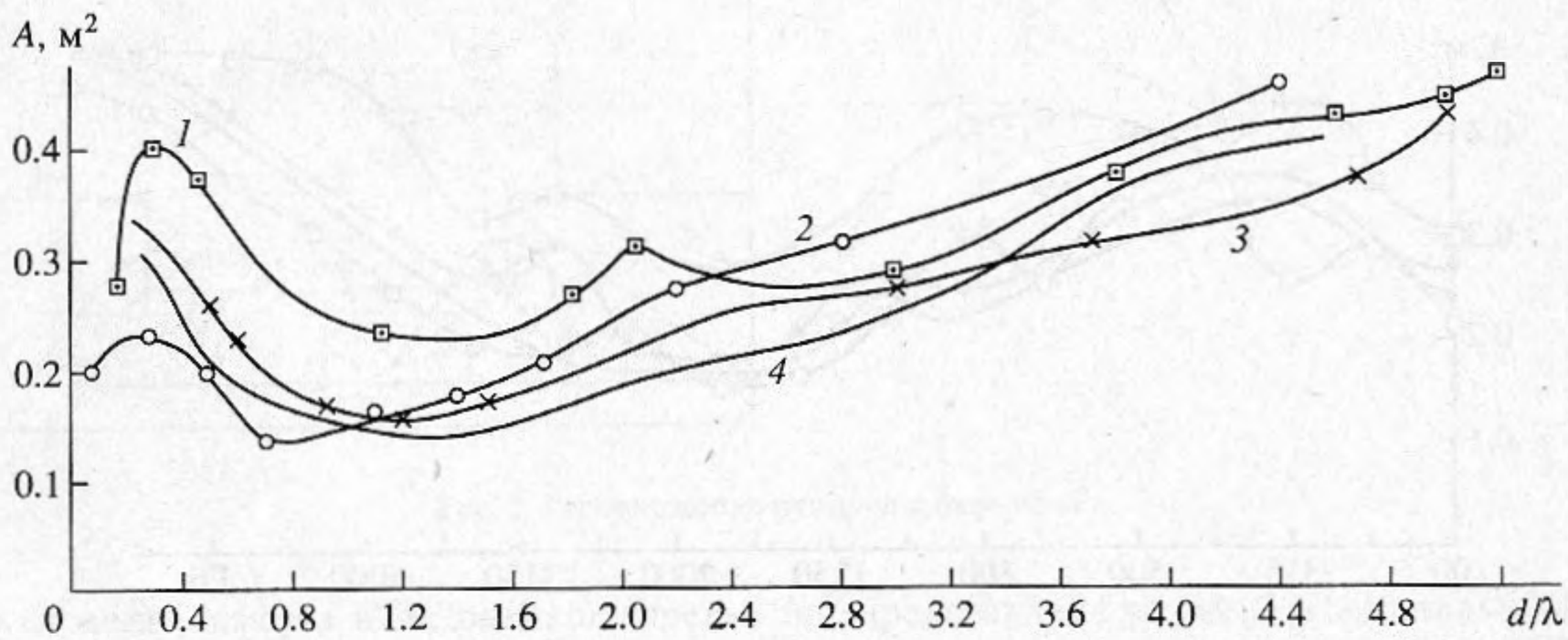


Рис. 8. Поглощение звука технологическими отверстиями, *1* – квадратное отверстие, *2* – круглое отверстие, *3* – прямоугольное отверстие 1 : 2, *4* – прямоугольное отверстие 1 : 4.

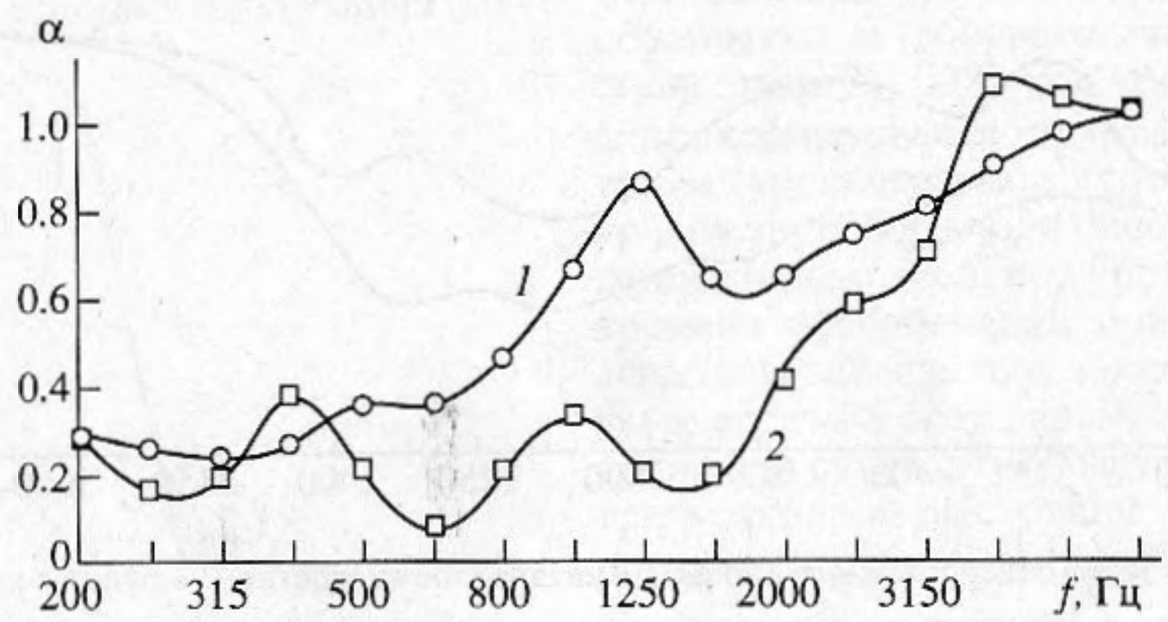


Рис. 9. Коэффициенты звукопоглощения рупоров, *1* – круглое устье $d = 108$ мм, *2* – квадратное устье 210×210 мм.

Для определения энергетических затрат на создание в камере акустического поля с заданным спектром весьма важной оказывается оценка нижней частотной границы диффузности поля звуковых стоячих волн в этой камере [5]. Соответствующее необходимое условие для "пустой" камеры (без рупоров и отверстий) может быть записано в виде $f_{диф} > 3c/l_{min}$, где c – скорость звука в камере, l_{min} – минимальный линейный размер камеры ($l_{min} = l_x$). Указанное условие, однако, не является достаточным, и необходимо проводить дополнительную оценку $f_{диф}$ с учетом величины реального поглощения и плотности резонансных частот $\Delta f/\Delta N$. Эта оценка, как известно [6], принимает следующий вид $\Delta f/\Delta N \le \gamma/8$, где

$$\Delta N = [\,(L/8c) + (\pi S/2c^2)f + (4\pi V/c^3)f^2]\,\Delta f, \qquad \gamma = cA/4V, \tag{1}$$

причем в уравнениях (1) первый член в выражении для плотности мод обусловлен одномерными осевыми модами, второй – двумерными касательными, а третий – трехмерными косыми модами,

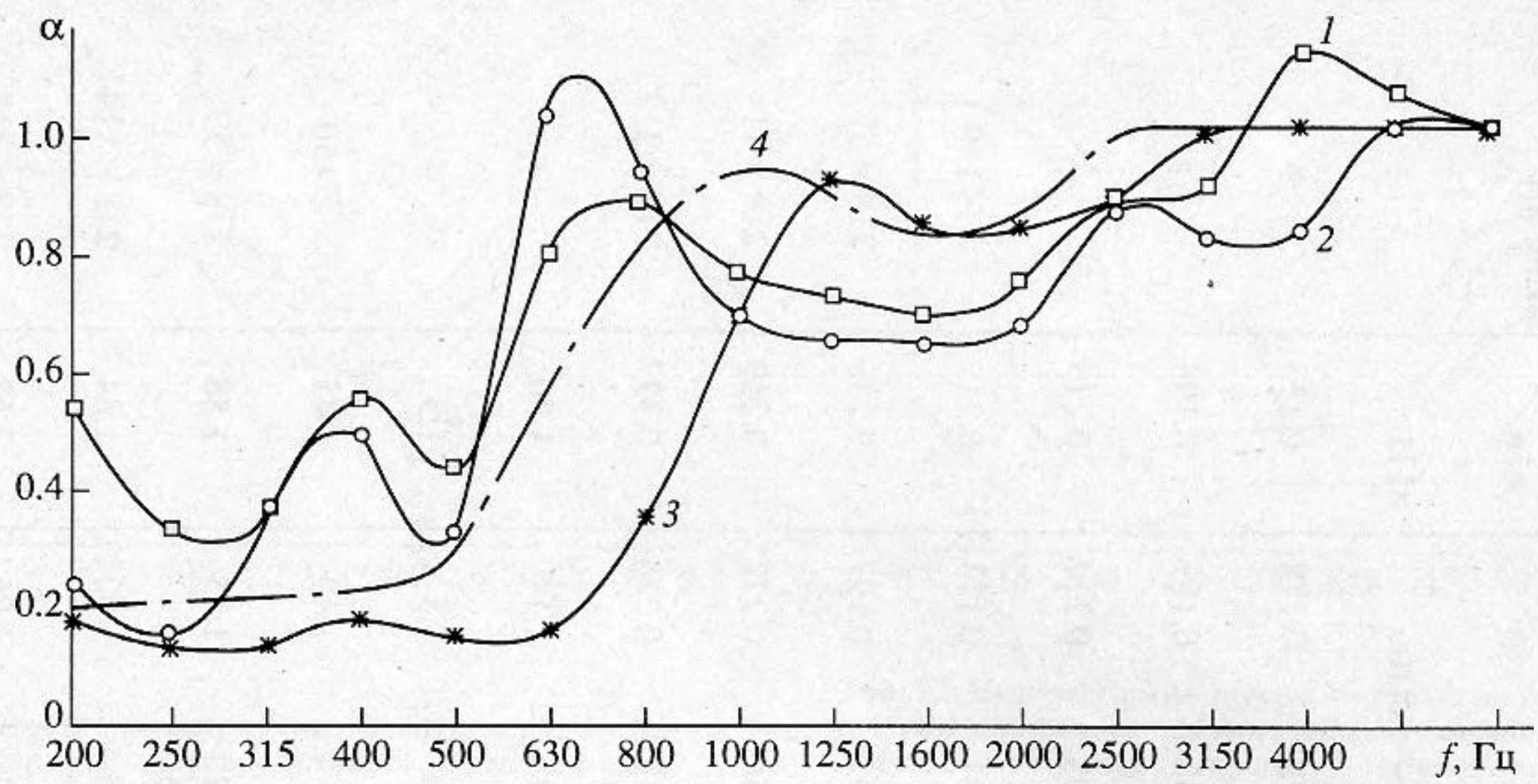


Рис. 10. Коэффициенты поглощения звука технологическими отверстиями, *1* – квадратное отверстие, *2* – круглое отверстие, *3* – прямоугольное отверстие 1 : 2, *4* – прямоугольное отверстие 1 : 4.

объем модели камеры составляет $V = l_x l_y l_z = 1.55$ м^3, площадь стен – $S = 2(l_x l_y + l_y l_z + l_x l_z) = 8.21$ м^2, сумма длин ребер – $L = 4(l_x + l_y + l_z) = 14.16$ м, A – общее поглощение стен и других устройств, расположенных в камере. В соответствии со стандартной методикой [5, 6] для модели камеры были определены величины ΔN, Δf, $\Delta f/\Delta N$, а также значения суммарных поглощений A при различных вариантах расположения отверстий и рупоров (см. табл. 2), при этом для каждого случая была рассчитана соответствующая ширина резонансного пика и значение нижней частотной границы диффузного поля. По материалам расчетных и экспериментальных оценок, представленных в табл. 2, следует отметить, что в "пустой" камере поле должно быть диффузным начиная с частоты 1600 Гц, наличие же рупоров и технологических отверстий, как показали эксперименты, существенно понижает это значение. Так, например, при наличии низкочастотного рупора с квадратным устьем, технологических отверстий с соотношением сторон 1 : 4 или 1 : 1 в модели камеры определено, что поле должно быть диффузным начиная с частот f = 1250, 1000 и 800 Гц соответственно. Коэффициент поглощения для рупора с квадратным устьем зависит от частоты и в интервале частот 400 - 2000 Гц (40 - 200 Гц для натурной РКВУ) изменяется от 0.2 до 0.5 и приближается к единице при f = 4000 Гц (рис. 9). Коэффициент же поглощения звука круглым отверстием, равным по диаметру диагонали квадрата, достигает в том же диапазоне частот более высоких значений (0.4 - 0.6) и достигает значения единица при f = 3400 Гц (рис. 10). При использовании рупоров с круглым устьем в диапазоне частот 800 - 3150 Гц прогнозируемые значения a изменяются в пределах от 0.5 до 0.8, а при частотах выше 500 Гц приближаются к единице (рис. 9). На рис. 10 приведены для сравнения зависимости нормированных коэффициентов поглощения звука круглого и различных прямоугольных отверстий, оцененные в том же диапазоне частот.

Следующими важными параметрами, подлежащими определению по результатам экспериментов, являлись необходимые для проектирования натурной РКВУ однозначно связанные с величиной общего поглощения A и друг с другом коэффициенты повышения акустической мощности источников звука $k(A)$ и осредненных потерь уровня звукового давления $\Delta L(A)$ за счет установки в камере рупоров и отверстий. Поскольку затраты акустической энергии на создание в объеме камеры заданного среднего уровня звука очевидно пропорциональны величине A общего поглощения звука в объеме камеры, то эти коэффициенты могут быть выражены через поглощение в отсутствие (A_o) и в присутствии (A_p) рупоров и отверстий в виде:

$$\Delta L(A) = 10\lg(A_o/A_p), \quad k(A) = 10^{-0.1\Delta L(A)}. \quad (2)$$

По результатам исследования можно отметить, что в диапазоне 1000 - 5000 Гц (в натурной РКВУ 100 - 500 Гц) максимальные потери в уровне звукового давления за счет одного рупора с квадратным или круглым устьем могут составить до 0.3 - 0.4 дБ – рис. 11. Анализ первого из соотношений (2) показывает, что при установке нескольких (m) рупоров с круглым устьем на стенках камеры, если пренебречь их взаимодействием, потери уровня возрастают в соотношении $1g(A_{pm}/A_o)/1g(A_p/A_o)$, где $A_p = A_o + \Delta A_p$, $A_{pm} = A_o + m\,\Delta A_p$, а ΔA_p – поправка к поглощению "пустой" камеры A_o за счет установки одного рупора. То есть величина поправки существенно зависит от величины отношения

Таблица 2

1	$f_ц$	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	Размер технологического отверстия, мм
2	Δf	115	146	183	231	291	365	461	579	730	919	
3	ΔN	27.66	49.97	91.62	167.16	307.9	595.1	1121.7	2118.9	4106	8111	–
4	$\Delta f/\Delta N$	4.16	2.92	2	1.38	0.945	0.613	0.411	0.273	0.178	0.113	–
5	A_1	0.33	0.226	0.248	0.193	0.131	0.125	0.161	0.148	0.167	0.198	–
6	A_2	0.215	0.226	0.21	0.2	0.163	0.146	0.169	0.205	0.219	0.219	–
7	A_3	0.321	0.236	0.272	0.201	0.145	0.136	0.178	0.161	0.173	0.212	∅150
8	A_4	0.269	0.239	0.196	0.226	0.158	0.144	0.143	0.163	0.197	0.23	218 × 57
9	A_5	0.296	0.257	0.225	0.242	0.165	0.157	0.168	0.256	0.222	0.269	218 × 114
10	A_6	0.376	0.385	0.375	0.323	0.26	0.243	0.266	0.312	0.286	0.377	218 × 218
11	$\gamma_1/8$	2.26	1.55	1.7	1.32	0.9	0.857	1.1	1.01	1.14	1.30	–
12	$\gamma_2/8$	1.47	1.55	1.44	1.37	1.12	1	1.16	1.405	1.5	1.5	–
13	$\gamma_3/8$	2.2	1.61	1.86	1.38	0.993	0.932	1.22	1.1	1.19	1.45	∅150
14	$\gamma_4/8$	1.84	1.64	1.34	1.55	1.08	0.99	0.98	1.12	1.35	1.58	218 × 57
15	$\gamma_5/8$	2.03	1.76	1.54	1.66	1.13	1.08	1.15	1.75	1.52	1.84	218 × 114
16	$\gamma_6/8$	2.56	2.64	2.57	2.21	1.78	1.67	1.82	2.14	1.96	2.58	218 × 218

Примечание. $A_i\gamma_i$ – поглощение и ширина пика резонансной кривой. $A_1\gamma_1$ – закрытая камера (без рупоров и технологических отверстий). $A_2\gamma_2$ – рупор с квадратным устьем 218 × 218 мм. $A_3\gamma_3$ - $A_6\gamma_6$ – камера с технологическим отверстием (см. табл.).

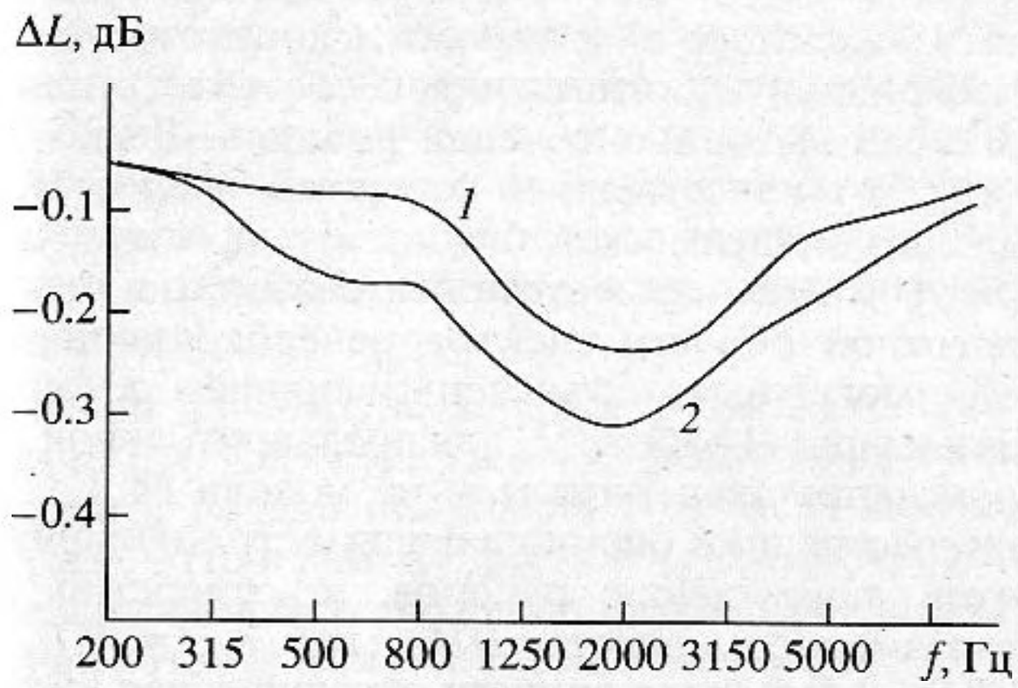


Рис. 11. Потери уровня звукового давления при установке рупоров, *1* – круглое устье $d = 108$ мм, *2* – квадратное устье 210 × 210 мм.

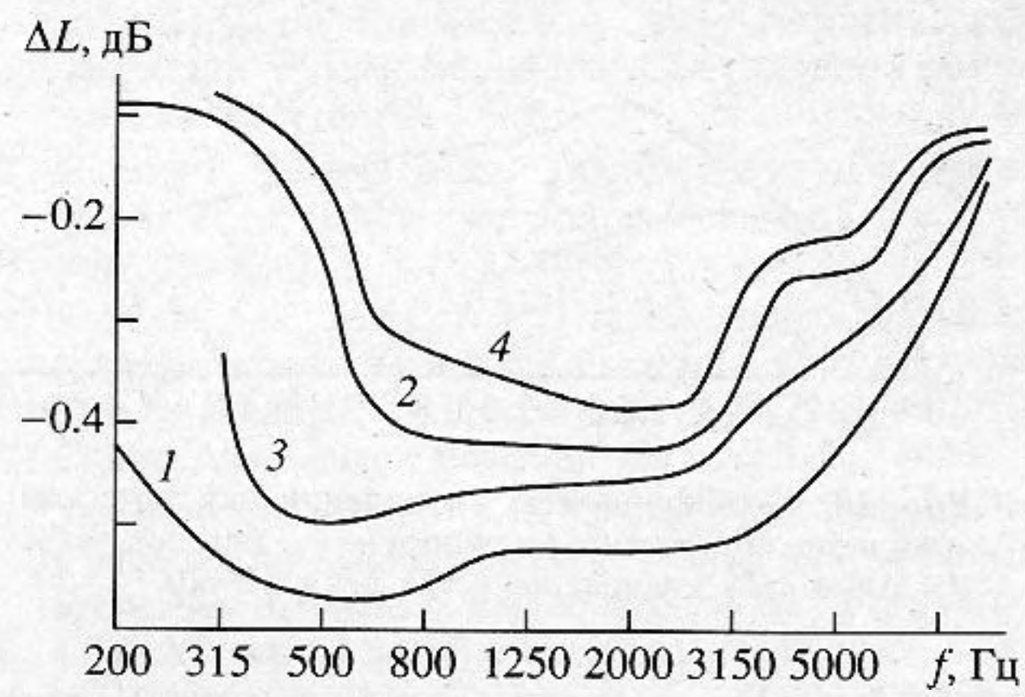


Рис. 12. Потери уровня звукового давления при наличии технологических отверстий, *1* – квадратное отверстие, *2* – круглое отверстие, *3* – прямоугольное отверстие 1 : 2, *4* – прямоугольное отверстие 1 : 4.

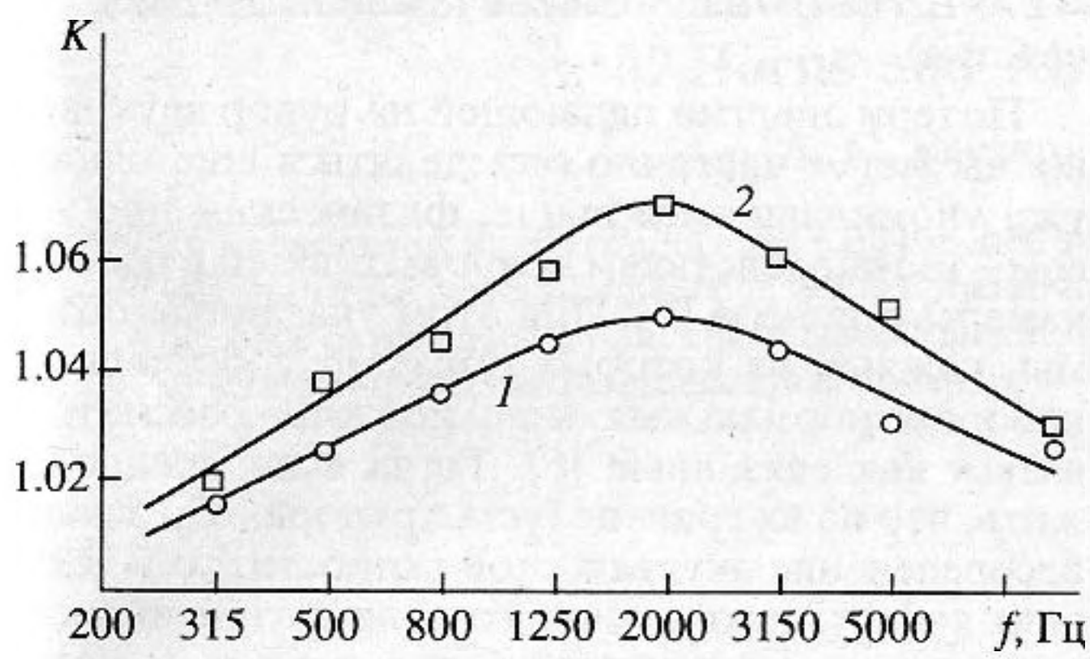


Рис. 13. Коэффициенты увеличения акустической мощности при установке рупоров, *1* – круглое устье $d = 108$ мм, *2* – квадратное устье 210 × 210 мм.

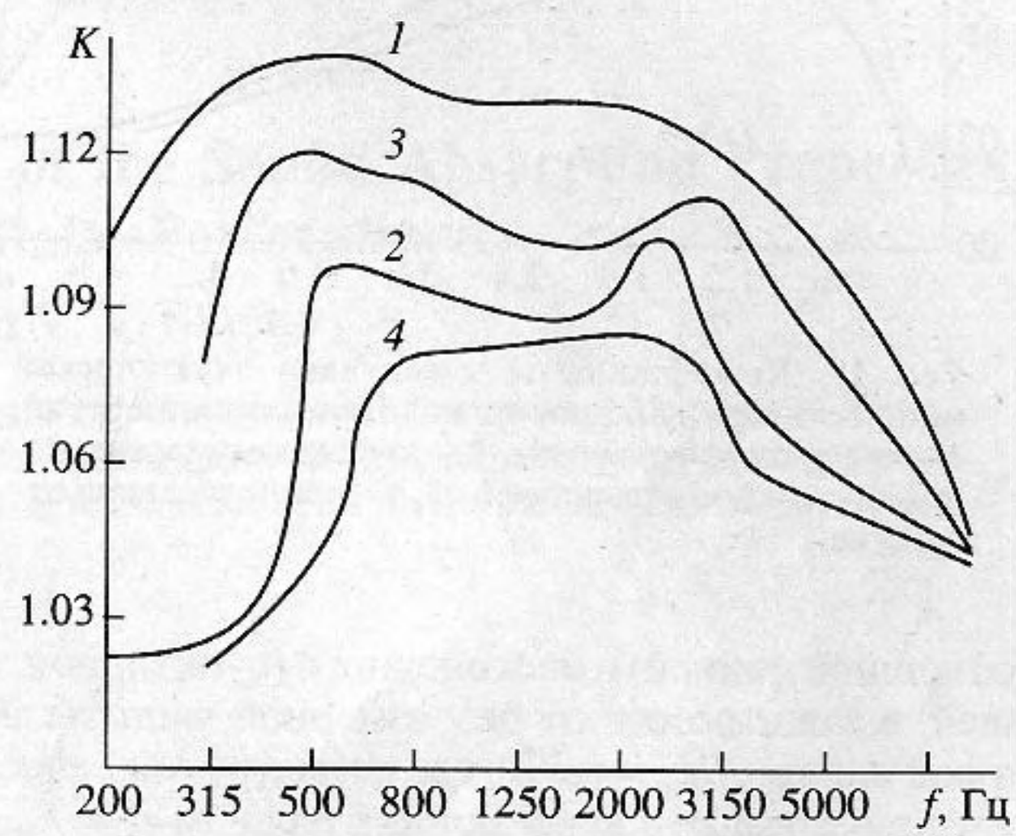


Рис. 14. Коэффициенты увеличения акустической мощности при наличии технологических отверстий, *1* – квадратное отверстие, *2* – круглое отверстие, *3* – прямоугольное отверстие 1 : 2, *4* – прямоугольное отверстие 1 : 4.

$\Delta A_p/A_o$. Так, если $\Delta A_p/A_o \gg 1$, то $\Delta L_{pm} - \Delta L_p = 10\lg m$. Для случая установки двух или трех одинаковых рупоров с круглым устьем потери уровня звукового давления возрастут в 1.4 и 2.2 раза соответственно. Поглощение звука квадратным отверстием в том же диапазоне частот приводит к снижению уровня звукового давления на величину $\Delta L = 0.4 - 0.5$ дБ – рис. 12.

Соответствующие значения коэффициентов увеличения акустической мощности, необходимой для компенсации дополнительного поглощения звука рупорами и отверстиями, также могут быть оценены в зависимости от частоты звука или от отношения наибольшего размера отверстия к длине волны звука. Эти коэффициенты колеблются от 5 - 7% для одного рупора с круглым или квадратным устьем (рис. 13, 15) до 14% для технологических отверстий квадратной или прямоугольной формы (рис. 14, 16) и, соответственно, возрастают при увеличении числа отверстий или рупоров.

Обзор известных теоретических результатов начнем с анализа результатов решения задачи об оценке импеданса экспоненциального рупора [5, 6]. При этом в работе [5] рассчитывалась мнимая X и действительная R части полного сопротивления единицы площади устья рупора Z при падении плоской волны вдоль его оси. Мерой интересующего нас коэффициента поглощения единицы поверхности выходного сечения рупора при нормальном падении звуковой волны может служить величина отношения R/Z. Зависимости R и X для экспоненциальных рупоров кругового сечения в безграничном пространстве – конечного

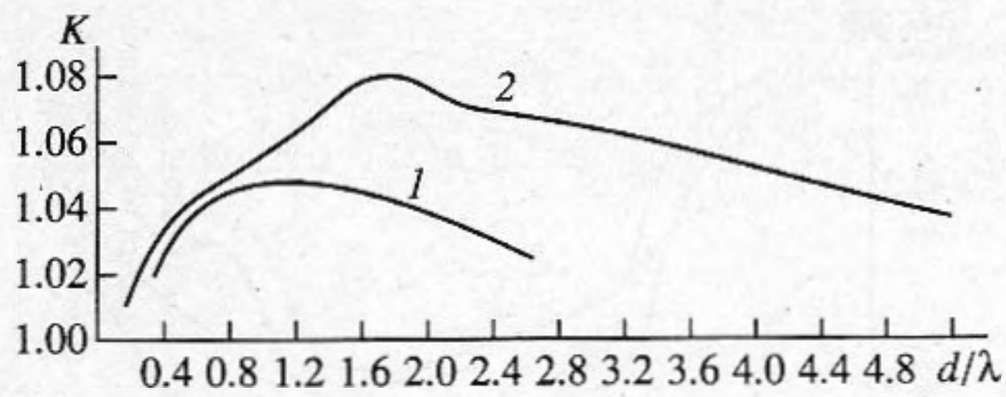


Рис. 15. Коэффициенты увеличения акустической мощности при установке рупоров, *1* – круглое устье $d = 108$ мм, *2* – квадратное устье 210×210 мм.

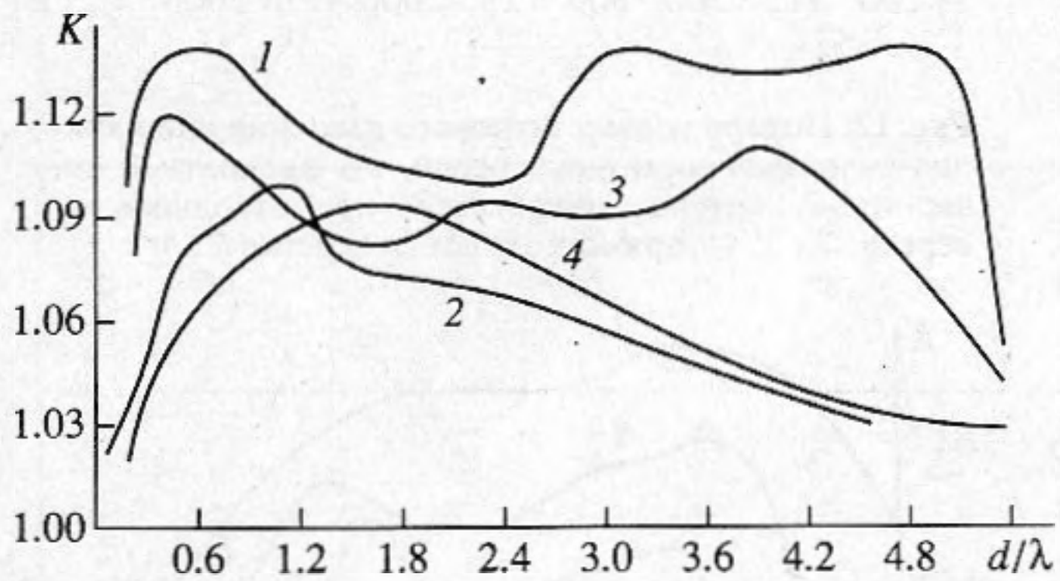


Рис. 16. Коэффициенты увеличения акустической мощности при наличии технологических отверстий, *1* – квадратное отверстие, *2* – круглое отверстие, *3* – прямоугольное отверстие 1 : 2, *4* – прямоугольное отверстие 1 : 4.

(сплошной линией) и бесконечного (пунктирной линией) в зависимости от безразмерной частоты звуковой волны ($f/f_{кр} = \pi d/\lambda$), где диаметр поперечного сечения устья рупора d принят равным $d = \lambda_{кр}/\pi$, позволяют произвести сравнение результатов экспериментов с теоретическими расчетами коэффициентов поглощения звука рупорами различной длины и убедиться в их качественном совпадении. Отметим, что с увеличением длины согласующего устройства интервалы между экстремумами сплошных кривых становятся короче, то есть спектр собственных частот тем плотнее, чем длиннее рупор. При $f = f_{кр}$ активная компонента входного сопротивления конечного рупора не равна нулю, как у бесконечного, то есть рупор конечных размеров на низких частотах все же частично поглощает энергию. Например, для рупора длиной d, параметры которого приведены в работе [5] – при $f = f_{кр}$ – до 10% акустической энергии, падающей по нормали к выходному сечению рупора, теряются при отражении от устья рупора в расчете на единицу площади (коэффициент поглощения a порядка 0.1), что значительно больше чем при отражении от стен бокса камеры (a порядка 0.01). Для сравнения этих результатов с экспериментальными данными, приведенными на рис. 7, 8, следует их шкалу на оси абсцисс уменьшить в масштабе π^{-1} и умножить прогнозируемые коэффициенты поглощения на соответствующие площади выходных сечений рупоров. Легко видеть, что качественный характер экспериментальных зависимостей близок к теоретическим, при этом некоторые отличия, особенно в низкочастотной области спектра реверберационного поля, могут быть объяснены влиянием резонансов камеры. В работе [1] для предварительной (до проведения экспериментов на модели М 1 : 10) количественной оценки зависимости коэффициентов поглощения рупоров и отверстий от безразмерной частоты ($f/f_{кр}$, где $\lambda_{кр} = c/f_{кр} = (3.0 - 3.5)d$) была принята эмпирическая кусочно-непрерывная функция, линейно изменяющаяся с частотой при $(f/f_{кр}) \leq 3.5$ и равная 1 на более высоких частотах, при этом коэффициент пропорциональности выбирался различным для квадратного и круглого сечений. Такая же методика приближенной оценки использовалась и для технологических отверстий, где в качестве критической частоты использовалась величина ($f_{кр} = 270/l_э$, где $l_э$ – наибольший линейный размер отверстия).

Потери энергии падающей на рупор звуковой волны могут частично определяться еще одним, уже упоминавшимся выше, физическим процессом – взаимодействием волновых полей в объеме камеры и рупора [1]. При этом указанные объемы, каждый из которых обладает собственным набором нормальных мод, должны рассматриваться как связанные [6]. Тогда если предположить, что на их границе (устье рупора – S_o) задано распределение акустической скорости, то в условиях диффузного волнового поля, интенсивности звукового поля в рупоре I_p и в камере I_k могут быть выражены через акустическую проводимость единицы площади устья $\zeta = R/(R^2 + X^2)^{1/2}$, общее поглощение внутренних стен рупора a_p и камеры A_o, а также мощность W излучателя звука, установленного в рупоре, в следующем виде [6]:

$$I_p = W(A_o + 8S_o\zeta)\,[\,(a_p + 8S_o\zeta)\,(A_o + 8S_o\zeta) - (8S_o\zeta)^2\,]^{-1} \cong (W/(a_p + 8S_o\zeta)),$$

$$I_k = 8WS_o\zeta\,[\,(a_p + 8S_o\zeta)\,(A_o + 8S_o\zeta)\,]^{-1}.$$

Оценки показывают, что для высоких частот ($f > f_{диф}$) потери энергии "озвучивание" рупора невелики и составляют до 4% для самого большого рупора с квадратным устьем, для более высокочастотных рупоров потери еще меньше. Эти потери не могли быть определены отдельно в экспериментах на модели и составляют только часть от значений коэффициентов $k(A)$, определенных выше. На частотах собственных колебаний объемов, например, на частотах аксиальных резонансов в рупоре, потери энергии могут существенно возрастать [6], так для большого рупора на

нижней частоте его аксиальных колебаний соответствующие оценки ожидаемых потерь могут достигать 10 - 15% [1], что не противоречит результатам экспериментов на модели, изложенным выше, так как в экспериментах ситуация, когда наблюдается исключительно аксиальная мода колебаний в объеме рупора, практически не реализовалась.

Один из авторов выражает признательность лично Дж. Соросу, поскольку подготовка данной статьи к печати проходила при частичной поддержке Программы долговременных грантов Международного научного фонда (фонда Сороса) в соответствии с грантом MNA.000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Семенов А.Г., Смыслов В.И., Пожалостин А.И., Шейко В.В.* Методика оценки характеристик реверберационных камер для испытания летательных аппаратов и их элементов на акустическое воздействие // Совместный отчет Акустического института и Центрального аэрогидродинамического института. М., 1979.
2. *Murray F.M.* Operational Characteristics of a 100,000 cubic foot Acoustic Reverberation Chamber // Shock and Vibration Bull. V. 5. P. 37. 1968
3. *Semenov A.G., Sheyko V.V.* Test Reverberation Chamber for High Power Vehicles Noise Simulation Acoustical Design Principles // Proceedings of INTERNOISE'93 Conference. Leuven-Belgium, 1993. V. 3. P. 1343.
4. *Semenov A.G., Sheyko V.V.* Matching Exponential Horn Connected to Mighty Pneumatic Siren Electroacoustic Properties Estimate // Proceedings of 31th Congress of Cheh Acoustical Society. Prague, 1994. P. 162.
5. *Фурдуев В.В.* Электроакустика. М.;Л.: Гостехиздат, 1948. 515 с.
6. *Morse P.M., Ingard K.U.* Theoretical Acoustics, N.-Y.–London: McGrow-Hill, 1968. 927 p.
7. *Мунин А.Г.* Авиационная акустика. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.

Test Reverberation Chambers: A Study of the Sound Absorption Properties of Horns and Air Offtake Perforations

A. G. Semenov and V. V. Sheiko

This paper sums up the results of an experimental study and a calculation sound absorption properties of horns and air offtake perforations used in test reverberation chambers to simulate, under testbed conditions, the acoustic loads experienced by aircraft at takeoff and in flight. The results can be of use in the design and operation of state-of-the-art test reverberation chambers.