

# КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО АРХИТЕКТУРНОЙ АКУСТИКЕ

Л.А. БОРИСОВ, доктор техн. наук, профессор, зав. лабораторией акустики и акустических материалов НИИСФ;  
А.А. ГЕРАСИМЕНКО, генеральный директор, А.И. РЯЗАНЦЕВ, исполнительный директор,  
С.С. САРКИСОВ, канд. техн. наук, зам. генерального директора по науке и инновациям, ООО «АСП ТЕХНОЛОДЖИ»

**В статье дается анализ комплексного решения, предлагаемого ООО «АСП ТЕХНОЛОДЖИ» и позволяющего получать звукопоглощающие системы, обеспечивающие акустический комфорт помещений различного назначения. Описана последовательность теоретических расчетов ожидаемого уровня акустических показателей, статического эксперимента, проведенного в лабораторных условиях, и динамических испытаний промышленных конструкций.**

**Работа выполнялась во взаимодействии с лабораторией акустики НИИСФ РААСН.**

Архитектурная акустика изучает распространение звуковых волн в помещении, отражение, перенаправление и поглощение их поверхностями. Целью исследований в области архитектурной акустики является создание комфортных условий восприятия звуковых сигналов в помещениях: театральных и киноконцертных залах, торгово-развлекательных, спортивных, лекционных, студийных и т.п. помещениях с заданными определенными акустическими условиями. Это отсутствие гулкости, высоких уровней шумового фона, хорошая разборчивость речи. В помещении с комфортной акустикой полезные звуки ак-

центрируются, а нежелательные устраняются или заглушаются до уровня, не вызывающего раздражения.

Для проектирования комфортной акустики помещений необходимы знания акустических свойств материалов и конструкций, применяемых в строительстве, для того чтобы рассчитать ожидаемые акустические свойства помещения в конкретной ситуации.

Перед началом разработки новых конструкций звукопоглощающих панелей целесообразно просчитывать ожидаемый акустический эффект от всех элементов, предназначенных для применения в разрабатываемой конструкции. Этот метод может быть весьма полезным и на этапе проектирования специальной конструкции акустической облицовки для какого-либо объекта, т.к. позволяет не только предсказать спектральную характеристику коэффициента звукопоглощения, но и выбрать некоторый оптимальный вариант конструкции, а также наиболее оптимальный способ ее размещения в помещениях.

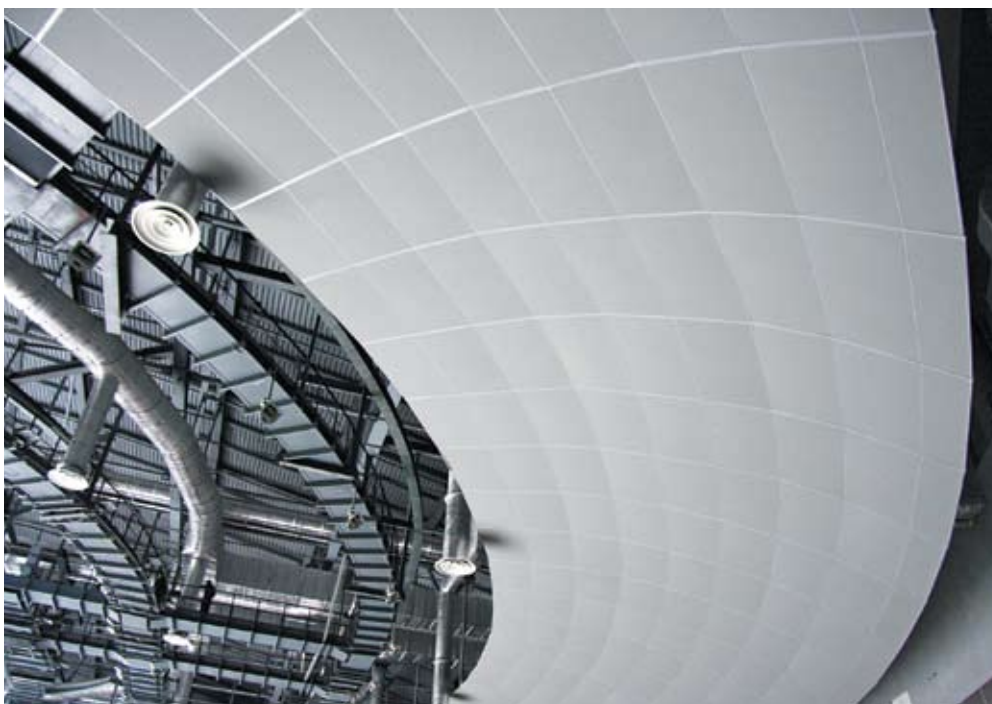
При этом целесообразно последовательно подходить к разработкам в 3-х направлениях:

1. Теоретический расчет ожидаемого акустического эффекта от звукопоглощающих конструкций для необходимого уровня акустического комфорта на заданных частотах.

2. Статический эксперимент ожидаемого акустического комфорта с применением лабораторной техники, например, для определения коэффициентов звукопоглощения образцов по стандартной методике с использованием акустического интерферометра [1, 2, 3].

3. Динамические испытания готовых решений в реверберационной камере.

Именно эти 3 направления «АСП ТЕХНОЛОДЖИ» применяет при разработке новых систем звукопоглощающих конструкций.



Лабораторией архитектурной акустики и акустических материалов НИИСФ РААСН и компанией «АСП ТЕХНО-ЛОДЖИ» проведены научно-технические работы по измерению частотных характеристик нормальных коэффициентов звукопоглощения  $\alpha$  (при нормальном падении звуковой волны на образец материала) образцов перфорированных металлических фрагментов с различными диаметрами перфорации и процентами открытой поверхности для применения в звукопоглощающих кассетах типа *Perfaten Acoustic*.

Как известно, основной величиной, характеризующей акустические свойства звукопоглощающих конструкций, является коэффициент звукопоглощения  $\alpha_k$  (КЗП), равный отношению поглощенной звуковой энергии к энергии, падающей на образец материала или конструкции.

Другой не менее важной характеристикой является акустический импеданс  $Z_k$  материала, конструкции или панели, выраженный в долях волнового сопротивления воздуха. По определению акустический импеданс представляет собой отношение звукового давления к колебательной скорости частиц среды на единицу площади поверхности, нормальной к направлению распространения плоской звуковой волны. В общем случае импеданс может быть записан в комплексной форме:

$$Z_k = R_k + iX_k,$$

где  $R_k$ ,  $X_k$  – действительная и мнимая компоненты импеданса.

Данные характеристики материала или конструкции можно достаточно точно определить методом акустического интерферометра, представляющего собой трубу диаметром 98 мм и длиной до 1,5 м. На одном конце трубы установлен громкоговоритель, а на другом – стакан с исследуемым материалом или конструкцией.

При подаче громкоговорителем звукового сигнала в трубе интерферометра устанавливается поле стоячей звуковой волны с характерными для него максимумами и минимумами звукового давления. Значения величин максимума и минимума и их отношение на каждой из звуковых частот меняются и зависят от степени затухания звуковой волны в трубе интерферометра при размещении на ее конце звукопоглощающего материала. Акустический анализатор позволяет непосредственно определять коэффициент звукопоглощения  $\alpha_k$  по специальной шкале прибора. Для этого в процессе измерений фиксируют значения величин максимумов и минимумов звукового давления в трубе интерферометра и координату первого (по отношению к испытываемому образцу) минимума стоячей волны. Значения отношения величин максимума и минимума и координаты первого минимума вводят в программу компьютера, которая также позволяет вычислить частотную характеристику коэффициента звукопоглощения  $\alpha_k(f)$  и, кроме того, действительную и мнимую составляющие импеданса.

Посредством системы «генератор – динамик», настроенной на заданную частоту,  $f$ , Гц, в трубе интерферометра возбуждается стоячая звуковая волна, обусловленная отражением от поверхности испытываемой конструкции и представляющая собой чередование максимумов

Таблица 1. Частотные характеристики коэффициентов звукопоглощения конструкций с перфорированным покрытием и с наполнителем из минеральной ваты толщиной 30 мм

№	Состав конструкции	Частотные характеристики нормальных коэффициентов звукопоглощения в октавных полосах частот					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Перфорированный лист, диаметр отверстий 0,75 мм, флис, минвата 30 мм	0,20	0,26	0,60	0,46	0,33	0,27
2	Перфорированный лист, диаметр отверстий 1,5 мм, флис, минвата 30 мм	0,13	0,23	0,60	0,89	0,92	0,90
3	Перфорированный лист, диаметр отверстий 2 мм, флис, минвата 30 мм	0,19	0,30	0,59	0,88	0,85	0,84
4	Перфорированный лист, диаметр отверстий 3 мм, флис, минвата 30 мм	0,17	0,32	0,67	0,70	0,57	0,53
5	Перфорированный лист, диаметр отверстий mix, флис, минвата 30 мм	0,12	0,20	0,62	0,89	0,82	0,80
6	Перфорированный лист, диаметр отверстий – крупные, mix 1, флис, минвата 30 мм	0,16	0,55	0,90	0,78	0,75	0,65
7	Перфорированный лист, диаметр отверстий крупные mix 2, флис, минвата 30 мм	0,18	0,50	0,85	0,83	0,68	0,59
8	Перфорированный лист, диаметр отверстий 3 мм, приклеенный с внутренней стороны листа слой флиса,* воздушный относ конструкции на 50 мм	0,20	0,25	0,62	0,97	0,64	0,16

и минимумов звукового давления. Плавно перемещая тележку с акустическим зондом от поверхности конструкции (нулевая отметка на шкале) внутрь трубы, находят в соответствии с показаниями анализатора ближайший (первый) минимум (узел) звукового давления. В этой точке измеряют расстояние  $d_1$ , см, между поверхностью конструкции и первым минимумом, а также фиксируют показание вольтметра, соответствующее амплитуде звукового давления  $P_{min}$ , в узле стоячей волны. Передвигая далее зонд влево или вправо от минимума, находят пучность стоячей волны и определяют максимальную амплитуду  $P_{max}$  звукового давления.

По значениям  $d_1$ ,  $P_{min}$ ,  $P_{max}$  рассчитывают действительную  $R_k$  и мнимую  $Y_k$  компоненты импеданса  $Z_k = R_k + iY_k$  конструкции по следующим формулам:

$$R_k = \frac{2N}{G}; Y_k = \frac{(N^2 - 1)}{G} \sin \varphi,$$

где  $N = P_{max}/P_{min}$  – коэффициент «стоячести» звуковой волны в трубе;

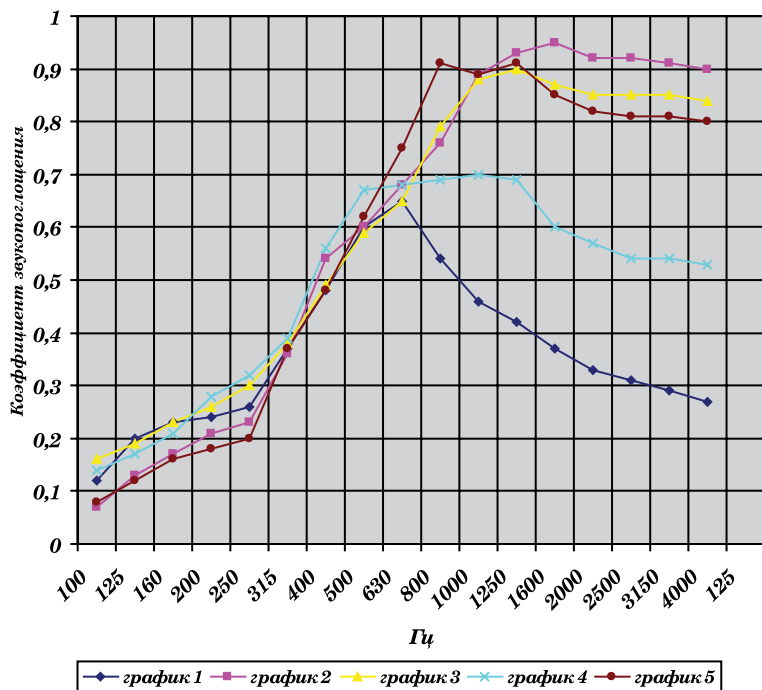


Рис. 1. Коэффициенты звукопоглощения перфорированных покрытий и с наполнителем из минеральной ваты толщиной 30 мм.

Условные обозначения: график 1 – перфорированный лист с отверстиями 0,75 мм, график 2 – то же, но с отверстиями 1,5 мм, график 3 – то же, но с отверстиями 2 мм, график 4 – то же, но с отверстиями 3 мм, график 5 – то же, но с отверстиями mix

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \left( d_1 - \frac{\lambda}{4} \right) - \text{фаза стоячей волны длиной } \lambda, \text{ см;}$$

$$G = N_2 + 1 - (N^2 - 1) \cos \varphi;$$

$$\lambda = \frac{C_0}{f}, \text{ см, где } C_0 - \text{ скорость звука в воздухе, см/с.}$$

Коэффициент звукопоглощения  $\alpha_k$  конструкции также может быть вычислен по формуле (1) через импеданс  $Z_k$  или по формуле (2) через коэффициент  $N$ .

$$\alpha_k = 1 - \left| \frac{Z_k - 1}{Z_k + 1} \right|^2 = \frac{4R_2}{(R_k + 1)^2 + Y_k^2} \quad (1)$$

или по формуле (2):

$$\alpha_k = \frac{4}{N + N^{-1} + 2}, \quad (2)$$

где  $N$  определяется отношением  $N = \frac{P \max}{P \min}$ . (3)

Точность определения величины  $\alpha_k$  зависит от степени поглощения звуковой энергии акустической конструкцией. Если поглощение невелико ( $\alpha_k < 0,2$ ), погрешность составляет 10-15%. При достаточно большом поглощении ( $\alpha_k > 0,5$ ) погрешность уменьшается до 2-5%. Высокая точность определения коэффициента звукопоглощения обусловлена тем, что величина  $\alpha_k$  зависит только от отношения амплитуд звукового давления в максимуме и в минимуме волны, которое может быть достаточно точно зафиксировано прибором. В отличие от коэффициента звукопоглощения акустический импеданс зависит существенно от фазы стоячей волны  $\varphi$ , при определении которой возможны погрешности в измерении расстояния  $d_1$  без учета влияния поправки к акустическому зонду.

Для проведения испытаний в качестве звукопоглощающего наполнителя конструкций были выбраны 2 образца, вырезанные из минераловатных плит толщиной 30 и 50 мм, и защитная продуваемая ткань типа флис, укладываемая в конструкцию между покрытием и слоем из минераловатной плиты. Образцы конструкций устанавливали в стакане интерферометра непосредственно на жестком дне, за исключением образца с наклеенным слоем из материала типа флис. Результаты измерений коэффициентов звукопоглощения всех образцов, измеренных в октавных полосах частот, представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2.

Замена в конструкциях с перфорированными покрытиями наполнителя из минераловатной плиты толщиной 30 мм на такой же наполнитель из плиты толщиной 50 мм несколько увеличило коэффициенты звукопоглощения, особенно в области низких частот. На средних и высоких частотах были отмечены лишь снижения значений коэффициентов звукопоглощения перфорированных конструкций, что объясняется смещением резонансов в отдельных конструкциях, вызванных изменением импеданса минераловатного наполнителя из-за увеличения его толщины.

Таблица 2. Частотные характеристики коэффициентов звукопоглощения конструкций с перфорированным покрытием и с наполнителем из минеральной ваты толщиной 50 мм

№	Состав конструкции	Частотные характеристики нормальных коэффициентов звукопоглощения в октавных полосах частот					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Перфорированный лист, диаметр отверстий 0,75 мм, флис, минвата 50 мм	0,27	0,31	0,50	0,38	0,31	0,31
2	Перфорированный лист, диаметр отверстий 1,5 мм, флис, минвата 50 мм	0,19	0,40	0,81	0,85	0,81	0,90
3	Перфорированный лист, диаметр отверстий 2,0 мм, флис, минвата 50 мм	0,20	0,35	0,83	0,85	0,81	0,86
4	Перфорированный лист, диаметр отверстий 3,0 мм, флис, минвата 50 мм	0,27	0,40	0,62	0,58	0,52	0,46
5	Перфорированный лист, диаметр отверстий mix, флис, минвата 50 мм	0,21	0,32	0,85	0,82	0,78	0,80
6	Перфорированный лист, диаметр отверстий 0,75 мм, минвата 50 мм	0,23	0,48	0,88	0,79	0,64	0,43

Как мы уже отмечали, коэффициент звукопоглощения и импеданс конструкции являются функциями частоты звука, толщины слоя звукопоглощающего материала, акус-

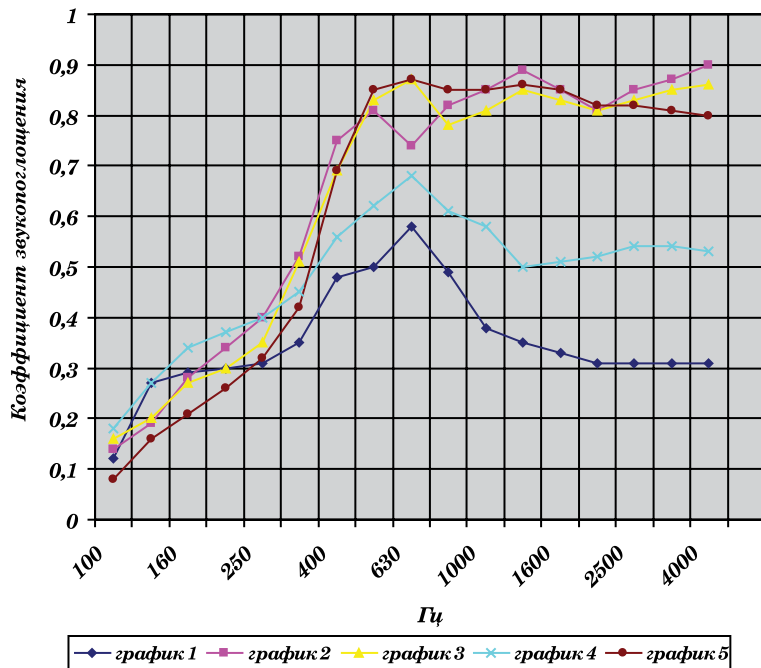


Рис. 2. Коэффициенты звукопоглощения перфорированных покрытий и с наполнителем из минеральной ваты толщиной 50 мм. Условные обозначения: график 1 – перфорированный лист с отверстиями 0,75 мм, график 2 – то же, но с отверстиями 1,5 мм, график 3 – то же, но с отверстиями 2 мм, график 4 – то же, но с отверстиями 3 мм, график 5 – то же, но с отверстиями  $\pi$ х

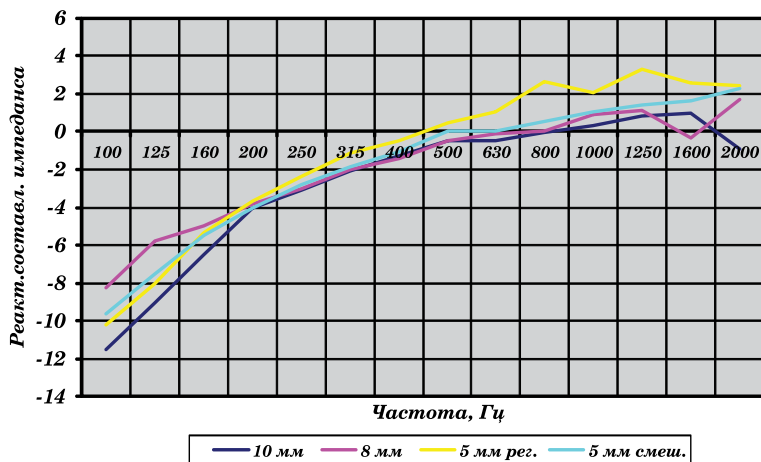


Рис. 3. Частотные характеристики реактивных составляющих импеданса перфорированных покрытий с разными диаметрами отверстий и с индексами перфораций 6-7% (рег.) и 14-15% (смеш. ряды)

тических свойств защитных и перфорированных покрытий (толщина покрытия, диаметр отверстий, индекс перфорации). При проектировании сложной звукопоглощающей конструкции можно пользоваться известной формулой сложения импедансов. Импеданс звукопоглощающей конструкции  $Z_k$  равен сумме импедансов всех составляющих конструкцию слоев.

$$Z_{\text{конструкции}} = Z_{\text{слоя}} + Z_{\text{ткани}} + Z_{\text{перфорированного покрытия}} \quad (4)$$

В общем случае импеданс  $Z_k = R_k + iY_k$ , где  $R_k$  и  $Y_k$  – действительная и мнимая составляющие, равен сумме импедансов всех компонент конструкции. Для нашего случая  $Z_{\text{кон}} = Z_{\text{сл}} + iY_{\text{п}} + R_{\text{тк}}$ , где  $Z_{\text{сл}} = R_{\text{сл}} + iY_{\text{сл}}$  – импеданс слоя волокнистого материала,  $R_{\text{сл}}$  и  $Y_{\text{сл}}$  – действительная и мнимая составляющие импеданса слоя;  $R_{\text{тк}}$  – действительная составляющая импеданса защитной ткани;  $Y_{\text{п}}$  – импеданс

перфорированной части панели с коэффициентом перфорации  $\eta$ , толщиной  $l_{\text{п}}$  мм, диаметром отверстия  $D_0$  мм. Величина  $Y_{\text{п}}$  может быть вычислена по формуле:

$$Y_{\text{п}} = k100 (l_{\text{п}} + 2\delta_{\text{п}}) / \eta, \quad (4.1)$$

где  $k = 2\pi f/c$  – волновое число в воздухе,  $l_{\text{п}}$  /мм, – толщина перфорированной панели,  $\delta_{\text{п}}$  – концевая поправка, см, определяемая выражением:

$$\delta_{\text{п}} = 0,4 D_0 (1 - 1,47\sqrt{\eta} + 0,47\eta\sqrt{\eta}) \quad (4.2)$$

Важную роль в этом соотношении играют мнимые (реактивные) составляющие импедансов  $jZ_2$ , поскольку именно они определяют местоположение максимума в частотной характеристике звукопоглощения конструкции. Реактивная составляющая слоя звукопоглощающего материала (упругость) имеет знак «минус», реактивная же составляющая перфорированного покрытия (масса) имеет знак «плюс». В результате их взаимодействия максимум звукопоглощения находится на той частоте, где суммарная составляющая реактивного импеданса конструкции приближается к нулю. Это хорошо видно на прилагаемом в качестве примера изменении импеданса (рис. 3).

На рис. 3 представлены реактивные составляющие импедансов конструкций, состоящих из слоя минеральной ваты плотностью 40 кг/м<sup>3</sup> и толщиной 50 мм с перфорированными покрытиями разных диаметров от 10 до 5 мм, с различными способами размещения отверстий (по регулярному или смешанному способам) и различными индексами (процентами) перфораций панелей. Кривые реактансов, причудливо переплетенные, пересекают «нулевую» прямую в разных местах. В этих же точках достигается и максимум коэффициентов звукопоглощения. Если по каким-либо причинам (а это бывает достаточно часто) реактивная составляющая несколько раз пересекает «нулевую» прямую графика на рис. 3, то столько же раз на частотной характеристике коэффициентов звукопоглощения на этих же частотах появляются резонансные подъемы коэффициентов, высота и ширина которых зависит от активной составляющей импеданса.

При нормальном падении звуковой волны величины  $Z_k$  и  $\alpha_k$  могут быть определены экспериментально на акустическом интерферометре по стандартной методике, изложенной выше. Экспериментальные значения коэффициента звукопоглощения приводятся, как правило, в справочниках и каталогах для некоторых конструкций. Однако при проектировании эффективных акустических панелей с наполнителями таких сведений недостаточно, требуется расчет коэффициента звукопоглощения облицовки в зависимости от структуры материала, а также толщины слоя. В этом случае для расчета импеданса используют акустические (волновые) параметры материала, служащего в качестве наполнителя.

Полученные результаты измерений свидетельствуют о достаточно высоких коэффициентах звукопоглощения всех образцов в средней и высокой области частотного диапазона. По результатам, полученным в интерферометре (статичес-



кие измерения), можно сделать лишь приближенную оценку класса каждой из конструкций, поскольку для полной классификации представленных конструкций необходимы значения коэффициентов звукопоглощения, полученные при измерениях реальных панелей методом реверберационной камеры (динамические измерения). Эти значения будут заведомо выше показанных в табл. 1, 2, особенно в области низких частот. Это наглядно показывают проведенные акустические испытания кассет Perfaten Acoustic и коэффициентов звукопоглощения методом реверберационной камеры в динамике. В соответствии с ГОСТ 31704-2011 (аналог EN-ISO 354-2003) в диапазоне частот от 100 до 5000 Гц проведены испытания этих кассет с перфорацией диаметром 0,75 мм (рис. 4, 5), с акустическим флисом и плитами из минеральной ваты толщиной 30 мм и 50 мм, изготовленных ООО «АСП ТЕХНОЛОДЖИ».

Таким образом, последовательное проведение начальных теоретических расчетов ожидаемого уровня акустических показателей; статических экспериментов в лабораторных условиях для получения подтверждающей составляющей акустического эффекта всех элементов, предназначенных для применения в разрабатываемой конструкции; динамических испытаний промышленно изготовленных конструкций реального размера позволяет получить заданную конструкцию звукопоглощающих систем, обеспечивающую акустический комфорт помещений.

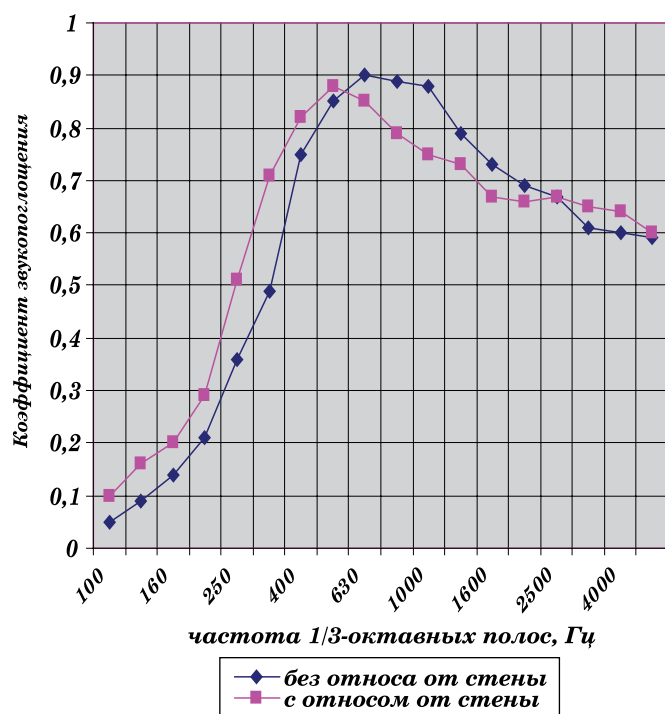


Рис. 4. Частотные характеристики реверберационного коэффициента звукопоглощения кассет перфорированных Perfaten Acoustic толщиной 30 мм, диаметр перфорации 0,75 мм

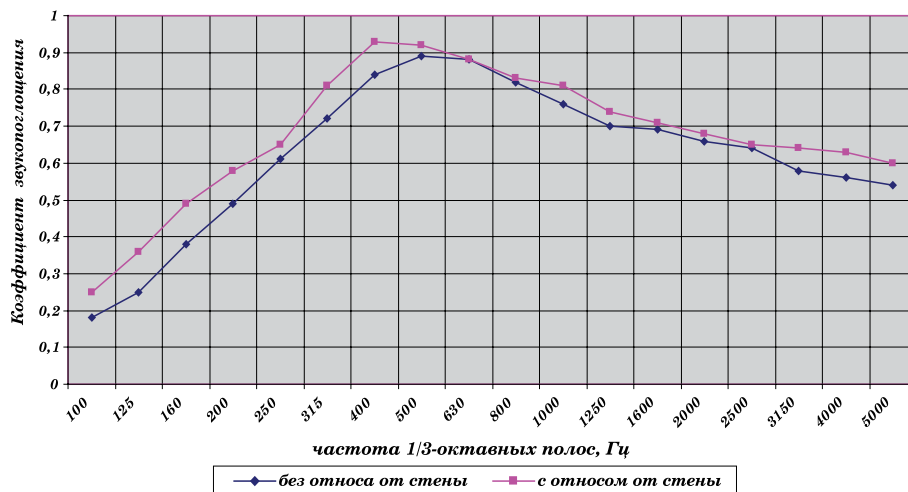


Рис. 5. Частотные характеристики реверберационного коэффициента звукопоглощения кассет перфорированных Perfaten Acoustic толщиной 50 мм, диаметр перфорации 0,75 мм

Однако для реализации комплексного подхода к акустическому комфорту этого недостаточно. Современные помещения имеют сложную геометрическую форму и, соответственно, сложные траектории распространения звуковых волн; оснащаются системами громкоговорителей, которые также надо учитывать в акустическом проекте. Требуется привязка разрабатываемых акустических звукопоглощающих систем к конкретному помещению, которые сегодня проектируются, реставрируются по индивидуальным и оригинальным проектам, в противоположность ранее применяемому типовому строительству.

Комплексные решения вопросов под ключ в настоящее время являются доминирующей политикой компаний, занимающих тот или иной сектор бизнеса. Именно с этой целью ООО «АСП ТЕХНОЛОДЖИ» в ближайшее время вводит новую услугу по ведению акустического проекта от начального этапа замера акустики исходных помещений любой сложности, расчета и подготовки проекта. При этом являясь разработчиком и изготовителем звукопоглощающих систем, ООО «АСП ТЕХНОЛОДЖИ» имеет возможность для конкретного помещения с заданной акустической и дизайн-функциональностью разработать, изготовить и оснастить его требуемой акустической конструкцией. Работы будут проводить квалифицированные специалисты, в т.ч. акустики-профессионалы с использованием современного мирового программного комплекса EASE. В наших следующих публикациях мы расскажем о них подробно.

С полной функциональной акустической линейкой продукции ООО «АСП ТЕХНОЛОДЖИ» можно ознакомиться на сайте компании – [www.al-sp.ru](http://www.al-sp.ru).



ООО «АСП-Технолоджи»

Россия, г. Видное

Южная промзона, 7

+7 (495) 223-07-45

[www.al-sp.ru](http://www.al-sp.ru)