

---

---

**КЛАССИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ И ТЕОРИИ ВОЛН**

---

---

УДК 534.21

## ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА И МЕТАМАТЕРИАЛЫ (ОБЗОР)

© 2018 г. Ю. И. Бобровницкий<sup>а</sup>, \*, Т. М. Томилина<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
101990 Москва, Малый Харитоньевский пер. 4, Россия

\*e-mail: yuri@imash.ac.ru

Поступила в редакцию 01.11.2017 г.

Дан обзор и анализ методов решения и современного состояния задачи о поглощении звука в линейной постановке. Показано, что большая часть публикаций с точки зрения эффективности поглощения сводится к реализации одного из двух идеальных поглотителей: черного тела Кирхгофа и оптимального поглотителя. Эти два поглотителя имеют принципиально различные свойства: относительное сечение поглощения черного тела равно единице, в то время как для оптимального поглотителя оно является максимально возможным и может принимать значения много больше единицы. Решаемые ими практические задачи также различны. Обсуждаются пути создания современных эффективных поглотителей. Наиболее перспективными представляются поглотители из акустических метаматериалов, реализующие идеальные тела наилучшим образом, для изготовления которых необходимы развитые аддитивные технологии.

*Ключевые слова:* поглощение звука, черное тело, оптимальный поглотитель, акустические метаматериалы, аддитивные технологии

**DOI:** 10.1134/S0320791918040020

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задача о поглощении звука имеет двухвековую историю. На каждом этапе ее формулировка и результаты исследований менялись в зависимости от потребностей практики и уровня развития технологий. В настоящее время качественные изменения в технологиях и развитии научных исследований позволяют по-новому посмотреть на эту задачу и определить основные направления ее решения. Ниже приводится обзор и анализ основных научных результатов, полученных учеными и инженерами в акустике и других “волновых” областях науки, которые имеют отношение к пониманию современного состояния этой задачи. Особое внимание уделено понятию об оптимальном звукопоглотителе. Рассмотрение ограничено пассивными поглотителями и линейной постановкой задачи.

### 2. ЗАДАЧА О ПОГЛОЩЕНИИ ЗВУКА

Впервые задача о поглощении звука была сформулирована в первой половине 19-го века как задача о влиянии потерь энергии на звуковые колебания духовых музыкальных инструментов, и особенно органнх труб, с целью понять физические особенности их работы и улучшить качество их звучания. Усилиями Симеона Пуассона, Георга

Стокса, Густава Кирхгофа, Германа Гельмгольца и других известных ученых задача была решена. Было установлено, что основными физическими механизмами поглощения звука в газах являются *вязкое трение и теплопроводность*, были написаны и исследованы волновые уравнения с учетом потерь, решен ряд конкретных практических задач. В частности, Г. Кирхгофом было получено точное аналитическое решение задачи о колебаниях воздуха в трубах круглого сечения (органнх трубах). Обзор полученных результатов приведен в книге Рэлея [1], первое издание которой вышло в 1877 г. Они составляют основу современного понимания процессов поглощения звука в газах, пористых материалах и звукопоглощающих конструкциях.

В это же время, в 1860 году, Г. Кирхгоф [2], занимаясь тепловым излучением, ввел понятие о *черном теле*, которое полностью поглощает все падающее на него излучение, ничего не отражая и ничего сквозь себя не пропуская. Позднее Макс Планк [3] использовал это понятие для формулировки своего знаменитого закона излучения черного тела, сыгравшего важную роль в развитии современной физики. Хотя понятие о черном теле первоначально относилось к оптике, оно было распространено и на акустику и сегодня широко

используется в задачах излучения и поглощения, теории антенн и др.<sup>1</sup>

Новый толчок к развитию науки о поглощении звука дало строительство в начале 20-го столетия больших общественных зданий (кинотеатров, студий), в которых необходимо было создать хорошие акустические условия. Большую роль в решении этой задачи сыграли работы В. Сэбина, С. Эйринга и др. [5, 6], в которых были созданы начала статистической теории акустики помещений, учитывающей поглощение стен и геометрические параметры, что привело к разработке новых поглощающих материалов и звукопоглощающих конструкций, в которых эти материалы работают наиболее эффективно. В дальнейшем были разработаны более точные лучевая и волновая теории, но ряд полученных тогда результатов, например, формулы для времени реверберации — одного из главных показателей акустического качества помещений — остаются неизменными и продолжают использоваться и сегодня при проектировании зданий различного назначения.

Существенен вклад российских ученых в развитие строительно-архитектурной акустики в тридцатых годах в связи с планом строительства Дворца Советов в Москве. Это грандиозное сооружение поставило перед учеными целый ряд совершенно новых задач, связанных, в частности, с акустикой Большого зала на 20 тыс. мест. Для одной из таких задач (как сделать огромный купол над этим залом полностью неотражающим в широком диапазоне звуковых частот) было впервые теоретически доказано существование точного решения и предложены два способа его реализации — с помощью слоистых структур из поглощающих слоев (Г.Д. Малюжинец) и с помощью резонансных поглотителей (С.Н. Ржевкин). Обзор этих и других работ российских акустиков этого периода можно найти в [7, 8].

С появлением радио- и гидролокационной техники для обнаружения технических объектов стали разрабатываться новые звукопоглощающие конструкции для их защиты. Первые акустические антилокационные конструкции были созданы для германских подводных лодок [9, 10] и представляли собой покрытия из резиноподобного материала с периодическими включениями резонансного типа. Параметры покрытия и наи-

более важный из них, потери, выбирались таким образом, чтобы максимально приблизить его акустические свойства к свойствам черного тела Кирхгофа и таким образом подавить отражение гидролокационных сигналов. В настоящее время подобные звукопоглощающие конструкции — материалы и среды с периодическими включениями — получили название звуковых кристаллов и относятся к наиболее распространенному классу акустических метаматериалов, о которых будет сказано ниже.

До конца 20-го века развитие звукопоглощающих материалов и соответствующих технологий их изготовления [11, 12] было связано с решением задачи снижения шума от механических источников звука (машин, самолетов и пр.). Появились новые разделы акустики: помимо строительно-архитектурной акустики [13, 14], сложились судовая [15, 16], авиационная [17], автомобильная и другие разделы [18–20], в рамках которых разрабатывались решения с учетом функциональных особенностей технических объектов. Так, звукопоглощающие материалы и конструкции, применяемые в авиации, должны быть легкими, жаропрочными и гидрофобными — это керамические и металлические пены, материалы с памятью формы, сверхлегкие аэрогели [21]. Стали применять компьютерное моделирование и учитывать акустические критерии качества на начальных этапах проектирования [22, 23]. При этом новые разработки базировались на уже известных физических основах.

Новый фундаментальный результат в теории поглощения был получен в работе [24], в которой теоретически было впервые доказано, что как в электродинамике, так и в акустике могут в принципе существовать поглотители, относительное сечение поглощения которых может быть сколь угодно большим, а в пределе бесконечным. Формальное решение задачи, полученное только для поглотителей сферической и цилиндрической геометрии относительно амплитуд приходящих и уходящих волн, долгое время считалось практически нереализуемым, т.к. оно не определяло, как найденные поглотители должны быть устроены и какими физическими свойствами они должны обладать. Однако эти результаты, вместе с периодически появлявшимися в литературе примерами превышения планковского предела эффективности [25–28], оказали большое влияние на последующие исследования. Еще один теоретический результат, полученный в работе [29] касательно явления отрицательной рефракции, по сути, предопределил появление структур с необычными волновыми свойствами — метаматериалов.

### 3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

В настоящее время интерес к задаче о поглощении звука резко возрос, и соответственно уве-

<sup>1</sup> Примечательно, что одно из утверждений М. Планка о том, что черное тело имеет максимально возможную эффективность поглощения, стало общепринятым в электродинамике и в акустике и долгое время (почти весь 20-й век) считалось неоспоримым. Под эффективностью поглощения здесь и далее в статье понимается относительное сечение поглощения, т.е. отношение поглощенной мощности к падающей, которое для идеального черного тела равно единице [4]. Единице равно для него и относительное сечение рассеяния, поле которого вместе с падающим полем образует тень.

личилось количество публикаций. Идет поиск путей повышения эффективности существующих поглотителей, которые в рамках традиционных решений исчерпали свои возможности. В то же время появление материалов нового типа — *акустических метаматериалов (АММ)*, существенно расширивших диапазон известных волновых свойств, а также появление и быстрое развитие *аддитивных* (или порошковых) *технологий* создали реальные предпосылки для решения задачи на новом уровне.

Метаматериалы — это искусственно создаваемые структуры из ячеек малых волновых размеров (метаатомов), которые могут иметь, кроме обычных, такие эффективные свойства, какие даже не встречаются в природе. Их активное исследование началось в электродинамике и оптике в 1990-х годах после того, как было сконструировано и экспериментально изучено несколько таких структур, в том числе структура с отрицательной рефракцией. Исследования сильно активизировались с разработкой так называемого метода преобразовательной оптики [30, 31], позволившего получить теоретические решения для задачи о “шапке-невидимке”, о “суперлинзе” и для других задач, ранее считавшихся неразрешимыми. Реализовать эти решения возможно только с помощью метаматериалов. Дату опубликования метода, 2006 год, можно считать и годом рождения акустических метаматериалов, так как большинство результатов электродинамики и оптики были практически сразу распространены на акустику, и к настоящему времени число публикаций, посвященных только поглощению звука, превысило сотню. Ниже в разделах 4 и 5 приведен их краткий обзор и анализ с точки зрения используемых концепций, эффективности и физических свойств поглотителей.

Что касается концепций, то в современных публикациях их много: акустические черные дыры, акустические диоды, идеальные и совершенные поглотители, суперпоглотители и др. Они во многом совпадают, большая их часть заимствована из других областей науки и не всегда соответствует оригиналу. Тем не менее, с точки зрения эффективности поглощения все они могут быть сведены к двум базовым концепциям поглотителей: черному телу Кирхгофа и *оптимальному поглотителю*, а анализируемые ниже публикации могут быть разбиты на две группы по степени близости к этим базовым концепциям. Свойства черного тела хорошо известны: его относительные сечения поглощения и рассеяния равны единице. Понятие оптимального или наилучшего поглотителя введено сравнительно недавно в работе [32]. По определению, его относительное сечение поглощения является максимально возможным и может на порядки превышать единицу. Существование такого поглотителя было

теоретически предсказано еще в работе [24]. Однако только после того, как в работе [32] были найдены аналитически точные граничные условия на его поверхности, оптимальный поглотитель, обладающий предельно допустимой эффективностью, стал вполне реализуемым идеальным телом, к которому нужно стремиться при проектировании реальных высокоэффективных поглотителей звука.

В части возможной технологии для практической реализации современных моделей поглотителей важную роль играют аддитивные технологии. Поскольку метаматериалы являются конструктивно сложными структурами, то даже самые простые метаматериальные образцы были изготовлены на 3D-принтерах. Более сложные структуры метаматериалов являются более компактными, тонкостенными, с множеством мелких деталей, что заставляет совершенствовать аддитивные технологии, так что 3D-печать способствует развитию метаматериалов, но верно и обратное: метаматериалы стимулируют развитие аддитивных технологий.

#### 4. ЧЕРНОЕ ТЕЛО И ПОГЛОТИТЕЛИ ЗВУКА ИЗ АММ

**Черное тело.** По определению Кирхгофа, черное тело полностью поглощает всю падающую на него колебательную энергию, оно не отражает и не пропускает волны, отбрасывая тень. Для практики наиболее важными свойствами являются отсутствие отражения волн и отсутствие ближнего поля неоднородных волн. Для аналитического описания черного тела Кирхгоф предложил [33] следующие граничные условия на его поверхности: полное поле равно падающему полю на освещенной части и нулю на теневой части поверхности. Позднее было показано [34, 35], что они выполняются лишь приближенно для длин волн, малых по сравнению с размерами тела. Было также предложено несколько других моделей черного тела, но и они оказались приближенными, так что черное тело продолжает оставаться идеальным телом, практически реализуемым лишь приближенно. По-видимому, одними из лучших среди существующих его моделей являются так называемое согласованное тело, локальный поверхностный импеданс которого равен  $\rho c$ , и тело Макдональда [36], поле которого равно полусумме двух полей дифракции — на абсолютно твердом теле и на абсолютно мягком теле. Тело Макдональда долгое время считалось чисто абстрактным, пока в работе [32] для него не были найдены точные граничные условия. Обе модели, как и модель Кирхгофа, по своим свойствам лишь приближаются на высоких частотах к черному телу. Как показано в [32], с точки зрения поглощения тело Макдональда пре-

восходит согласованное тело, а с точки зрения отсутствия отражения предпочтительнее согласованное тело. По этой причине неотражающие покрытия всегда проектировались как согласованные тела [9, 10, 37–39]. Что касается модели Макдональда, то авторам не известны работы с примерами ее практического использования.

**Поглотители из метаматериалов с “мягким входом”.** Структура поглотителя, ставшая популярной в последние годы, основана на использовании т.н. градиентных сред или “систем с мягким входом” [40]. Благодаря плавному изменению параметров на границе среды с поглотителем коэффициент отражения в такой структуре оказывается близким к нулю. Примером такого поглотителя является известное покрытие из поглощающих клиньев в заглушенных акустических камерах [13]. Однако широкие возможности этой структуры были открыты только с появлением акустических метаматериалов.

Распространенная конструкция поглотителя этого типа представляет собой некоторый объем обычного звукопоглощающего материала (ядро), окруженный оболочкой из метаматериала. Роль метаматериальной оболочки состоит в согласовании среды с ядром. Падающая на оболочку волна мягко (без отражения) входит в оболочку, метаматериал которой направляет ее к ядру, в которое она входит также без отражения и там полностью поглощается.

Целый ряд поглотителей, воплощающих эту структуру в акустике, появился после публикации [41] в оптике. Типичные примеры приведены в ссылках [42–49]. Геометрия этих поглотителей пока ограничивается сферой и цилиндром. Друг от друга они отличаются используемым метаматериалом оболочки. Это либо неоднородная по радиусу слоистая структура, либо звуковые кристаллы с аналогичной радиальной зависимостью, либо т.н. дважды отрицательные метаматериалы (с отрицательной плотностью и отрицательным упругим модулем). Если сравнивать эти “все направленные” поглотители с согласованным поглотителем, который хорошо поглощает и не отражает только нормально падающие или близкие к нормальным волны, то, благодаря использованию метаматериалов, они демонстрируют равную эффективность при существенно меньших используемых объемах и массах. В этом состоит их основное достоинство. Однако их эффективность не может превышать эффективность черного тела. Отметим еще, что многие авторы работ по этим поглотителям называют их, вслед за [41], “черными дырами”, имея в виду отсутствие отражения, что не вполне оправдано, так как черное тело и черная дыра — это разные понятия (см. примечание 2).

**“Акустические черные дыры”.** Идея поглотителя, также названного “акустической черной дырой”, впервые была изложена в статье [50] на примере изгибных волн в стержне, а затем распространена на акустическую среду [51]. Идея состоит в том, чтобы заставить падающую волну распространяться без отражения по плавно неоднородной среде с уменьшающейся до нуля скоростью распространения. Параметры подбираются так, чтобы время прохождения волной конечного интервала было бесконечным и чтобы волна никогда не достигала конца интервала. Достаточно небольшого естественного затухания в среде или структуре, чтобы волна была полностью поглощена без отражения. Идея получила дальнейшее развитие [52–56]. Однако и эти поглотители имитируют благодаря мягкому входу не черную дыру, а черное тело Кирхгофа<sup>2</sup>.

**“Акустические диоды”.** Еще один тип акустических метаматериалов, которые авторы соответствующих публикаций называют акустическими диодами и которые в принципе хорошо подходят для создания эффективных поглотителей звука, близких к черному телу, — это структуры, где волны могут распространяться только в одном направлении. С физической точки зрения однонаправленное распространение означает нарушение принципа взаимности.

Согласно общему принципу Онзагера–Казимира [57], в акустике взаимность нарушается в движущихся средах, в активных системах и нелинейных структурах. В настоящее время работы по акустическим диодам ведутся во всех этих направлениях (см., например, [58–63]), но находятся пока на самой ранней стадии.

## 5. ОПТИМАЛЬНЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ И АММ

**Оптимальный поглотитель.** Свойства этого поглотителя существенно отличаются от свойств черного тела. По определению [24, 32], оптимальный поглотитель — это тело, которое среди всех возможных линейных вязкоупругих тел той же геометрии поглощает наибольшее количество энергии падающего поля. Для практики важно, что его эффективность (относительное сечение поглощения) является экстремальной (лат. *optimus* означает наилучший) и может на порядки превосходить эффективность черного тела. При-

<sup>2</sup> Представляется, что термин “акустическая черная дыра” не вполне подходит для описанных выше поглотителей. В космологии черная дыра — это область с такой огромной гравитацией, что ни тела, ни электромагнитное излучение не могут ее покинуть. Описанные поглотители звука обладают этим свойством только наполовину: они поглощают только звуковые волны от внешних источников, но, как можно показать, легко излучают в окружающее пространство волны от внутренних источников. Термин больше подходит к “акустическому диоду”.

чем речь идет не о каких-либо новых физических механизмах поглощения звука: увеличение эффективности есть результат резонансных явлений на границе поглотитель/среда и повышенных уровней колебаний границы. Из-за этого вокруг поглотителя формируется интенсивное ближнее поле, которое, взаимодействуя с падающим полем, создает условия, позволяющие оптимальному поглотителю “собрать” и поглощать энергию падающей волны с площади, намного превышающей площадь его поперечного сечения (см. рисунок 1б), в отличие от черного тела, поглощающего только падающее на него излучение (рисунок 1а).

В работе [32] доказано путем решения вариационной задачи в рамках импедансной теории, что тело является оптимальным поглотителем, если его комплексная матрица поверхностных импедансов<sup>3</sup>  $Z = R + iX$  равна эрмитово-сопряженной матрице импедансов излучения  $Z_{\text{rad}} = R_{\text{rad}} + iX_{\text{rad}}$  или, иначе,

$$X + X_{\text{rad}} = 0, \quad R = R_{\text{rad}}. \quad (1)$$

Так как импедансы излучения, определяемые свойствами окружающей среды, могут быть рассчитаны или измерены существующими средствами, то равенства (1) однозначно определяют граничные условия на поверхности оптимального поглотителя и вместе с волновым уравнением позволяют рассчитывать и анализировать его поле, вызванное любыми внешними источниками. С практической точки зрения уравнения (1) сводят задачу проектирования оптимального поглотителя к синтезированию структуры АММ по заданным поверхностным импедансам. Эта последняя задача аналогична синтезу электрических цепей по известным импедансам [64], но в акустике она пока мало исследована.

Физический смысл условий оптимального поглощения (1) состоит в следующем. Первое условие – равенство нулю суммы реактансов поглотителя и внешней среды – является условием их совместного резонанса. Однако этот резонанс особый. Так как реактансы излучения  $X_{\text{rad}}$  характеризуют реактивную часть отклика среды на внешнее воздействие (присоединенную массу, неоднородные волны) и обычно имеют массовый характер, то компенсация их реактансами поглотителя  $X$  упругого типа приводит к *поверхностному резонансу* с амплитудами, максимальными на границе поглотитель/среда и быстро убывающими при удалении от нее. Добротность резонанса

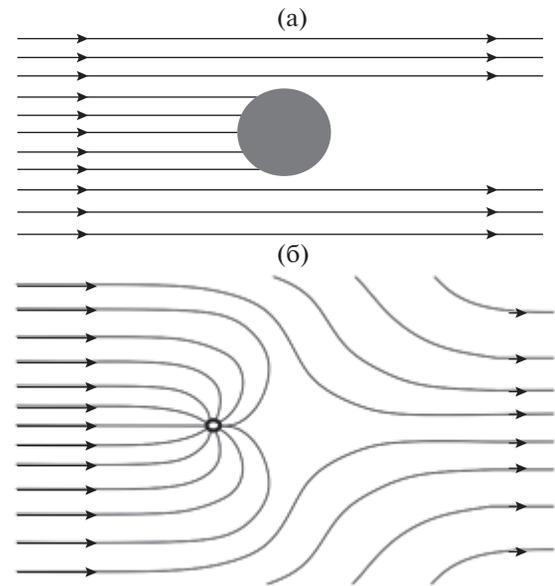


Рис. 1. Линии потока мощности при облучении плоской волной (а) черного тела и (б) оптимального поглотителя звука.

определяется сопротивлениями излучения  $R_{\text{rad}}$ . В литературе по акустике резонансы в протяженных системах и средах можно встретить под названиями краевых, граничных, интерфейсных или резонансов неоднородных и поверхностных волн [65–67]. В электродинамике и оптике аналогичные собственные движения известны как поляритоны [68].

Второе условие оптимального поглощения (1) – равенство сопротивлений поглотителя и внешней среды – можно также интерпретировать как своего рода *резонанс демпфирования* [69]. Любое отклонение сопротивлений поглотителя от сопротивлений излучения ведет к уменьшению мощности поглощения. Это условие аналогично известному результату теории электрических цепей [64]: мощность источника постоянного тока, отдаваемая сопротивлению нагрузки, максимальна, когда это сопротивление равно внутреннему сопротивлению источника.

Подчеркнем, что поглотитель звука является оптимальным, только когда выполняются одновременно оба условия (1) – условия частотного резонанса поверхности поглотителя и резонанса демпфирования. Важно и то, что условие частотного резонанса для оптимального поглотителя должно выполняться на всех частотах, в то время как практически его выполнение можно обеспечить только на дискретных частотах. Поэтому оптимальный поглотитель, как и черное тело Кирхгофа, является идеализацией, которая на практике реализуется только приближенно.

<sup>3</sup> Матрица  $Z$  определяется следующим образом. Поверхность  $A$  тела разбивается на  $N$  участков  $\Delta A_n$  малых волновых размеров. Каждый участок рассматривается как независимый вход, характеризующийся нормальной скоростью и силой, а все тело – как система с  $N$  входами. Связь между  $N$ -векторами сил и скоростей описывается  $N \times N$ -матрицей  $Z$ . Подробности см. в [32].

Условия (1) были подтверждены авторами с коллегами в лабораторных экспериментах на нескольких АММ-образцах поглотителей резонансного типа, изготовленных с помощью технологии 3D-печати, адаптированной для учета особенностей структуры акустических метаматериалов [70–74]. Кроме того, было показано теоретически и подтверждено экспериментально существование оптимального поглотителя и для вибраций упругих конструкций и выведены условия оптимальности, которые получаются из условий (1) замены импедансов излучения на импедансы пассивной (с выключенными источниками) упругой конструкции [75]. Отметим также работу [76], в которой предложена схема двумерной периодической структуры, приближенно моделирующей оптимальный поглотитель.

Концепция оптимального поглотителя пока мало разработана. В литературе есть ряд публикаций, имеющих то или иное отношение к оптимальному поглощению. Большая их часть относится к электронике, электродинамике и оптике и лишь малая часть – к акустике.

**Резонансный поглотитель в волноводе** – структура, которая исследована наиболее полно во многих работах, включая акустические, и для которой были получены условия максимального поглощения, близкие к условиям (1). Одной из первых таких работ является [77]. В ней рассмотрена микроволновая длинная линия (волновод) с резонансной полостью и показано, что наилучшее поглощение полость демонстрирует на резонансах при условии равенства ее добротности с добротностью линии, что аналогично второму условию (1). Похожие результаты были получены в оптике [78, 79], где для этого явления был введен отдельный термин “критическая связность” волновода с резонатором. В цикле работ по акустике [80–85], посвященных акустическим волноводам с резонаторами, на основе критической связности авторы также добиваются полного поглощения волн одиночным резонатором или системой резонаторов. Для настройки структуры они использовали комплексный коэффициент отражения: критическая связность соответствует пересечению его нулем действительной оси комплексной плоскости частоты.

**Совершенный когерентный поглотитель.** В литературе по оптике довольно широко обсуждается так называемый совершенный когерентный поглотитель (Coherent Perfect Absorber или CPA) – см., например, [86–88]. Он основан на аналитических свойствах матрицы рассеяния на комплексной плоскости частоты. Показано, что наибольшее поглощение света имеет место, когда один из нулей матрицы рассеяния пересекает действительную частотную ось и что этого можно добиться, подбирая нужным образом величину по-

терь в поглотителе. Авторы этих статей связывают CPA с обращенным во времени лазером. По сути, он является обобщением “резонатора в волноводе” на произвольные тела в пространстве и, следовательно, оптическим аналогом оптимального поглотителя звука.

**Сопряженный согласованный поглотитель.** Результаты, близкие к оптимальному поглощению, получены в ряде других работ последних лет в оптике и электродинамике [89–93]. В основном в них исследуются поглотители цилиндрической и сферической геометрий, которые допускают аналитические решения. В этих работах отмечена важная роль поверхностных резонансов, а использование импедансного описания поглотителя и среды позволило в [92] получить условия типа (1). В работе [91] приведены результаты лабораторных экспериментов, подтверждающие теорию.

## 6. ДРУГИЕ КОНЦЕПЦИИ

Помимо двух основных концепций – черного тела и оптимального поглотителя, рассмотренных выше, есть и другие концепции и подходы, перспективные с точки зрения создания эффективных поглотителей звука, которые остались за рамками настоящего обзора.

**Активное поглощение звука** – одна из таких концепций, основанная на поглощении звука дополнительными источниками. Так как с помощью активных методов можно в принципе создать любой импеданс на поверхности какого-либо тела, то можно, следовательно, создать и поглотитель, который по своим поглощающим свойствам будет сколь угодно близок к черному телу, к оптимальному или другому поглотителю. Основываясь на неограниченном потенциале активных методов, работы в этом направлении не прекращаются со времени публикации первых работ [94]. На эту тему уже получено много научных и практических результатов, которые нуждаются в отдельном обзоре. В настоящем обзоре отметим лишь несколько работ, где активные методы использованы для управления эффективными параметрами акустических метаматериалов [95–97].

**Нелинейное поглощение** – еще одна концепция с огромными возможностями, обусловленными наличием дополнительных физических механизмов поглощения – фазовых переходов, сухого трения и др. Как и в случае активных методов поглощения, в этой области накопилось много важных для практики результатов, которые также заслуживают отдельного обзора.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача о поглощении звука имеет обширную литературу (несколько тысяч публикаций) с множеством содержательных обзоров по разным аспектам

задачи, например, [11–13]. Поэтому представленный здесь обзор посвящен в основном работам последних лет, связанным с метаматериалами и новыми технологиями. Но и здесь авторы вынуждены были ограничиться пассивными поглотителями и линейными эффектами поглощения.

В обзоре показано, что большая часть современных публикаций представляет собой попытки реализовать один из двух идеальных поглотителей звука – черное тело Кирхгофа и оптимальный поглотитель. Эти два поглотителя имеют принципиально различные свойства и решают два круга почти непересекающихся практических задач. Черное тело, являясь идеальным неотражающим средством, не создающим ближнего поля, решает задачи защиты от гидролокаторов в судовой акустике, подавления эха в архитектуре и строительстве, служит поглощающим экраном в антенной и измерительной технике и т.п. Оптимальный поглотитель, который по своему определению поглощает больше акустической энергии, чем любое другое тело, является наилучшим средством при извлечении энергии колебаний, а также в борьбе с шумом на производстве, на транспорте и в других местах, где требуется поглотить как можно больше акустической энергии.

Акустические метаматериалы позволяют решать эти задачи при минимальных массах и объемах, а аддитивные технологии необходимы для их изготовления.

К настоящему времени наибольших успехов удалось достичь в задачах, где реализуется черное тело. Оптимальный поглотитель пока изучен мало и не вышел из стадии лабораторных исследований. Однако, учитывая потребности промышленности, особенно авиационной и космической техники, в высокоэффективных поглотителях, именно в этом направлении следует ожидать в ближайшее время наиболее значительных новых результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 15-19-00284).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей)*. Теория звука. Т. 2. М.: ГИТТЛ, 1955. 476 с.
2. *Kirchhoff G.* On the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat // *The London, Edinburg and Dublin Philosophical magazine and journal of science*. 1860. Series 4. № 130. P. 1–21. (Translation from *Annalen der Physik und Chemie*. 1860. V. 109. P. 275–301).
3. *Planck M.* *Theory of heat radiation*. Second edition. Philadelphia: P. Blakiston's son and Co., 1914 (Translation from *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius-Rarth, 1906).
4. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. М.: Наука, 1967. 460 с.
5. *Sabine W.C.* *Collected papers on acoustics*. Cambridge, USA: Harvard University Press, 1923. 350 p.
6. *Eyring C.F.* Reverberation time in “dead” rooms // *J. Acoust. Soc. Am.* 1930. V. 1. P. 217–241; Method of calculating the averaged coefficient of sound absorption // *J. Acoust. Soc. Am.* 1933. V. 4. P. 178–192.
7. *Андреев Н.Н., Григорьев В.С., Лейзер И.Г., Розенберг Л.Д., Тартаковский Б.Д.* Архитектурная акустика в СССР // *УФН*. 1949. Т. 37. № 3. С. 269–315.
8. *Ржевкин С.Н.* Обзор работ по резонансным звукопоглотителям // *УФН*. 1946. Т. 30. № 1–2. С. 40–62; *Успехи советской акустики // УФН*. 1948. Т. 34. № 1. С. 1–11.
9. *Meyer E., Kuhl W., Oberst H., Skudrzyk E., Tamm K.* *Sound absorption and sound absorbers in water*. Washington, D.C.: ASA, 1947. 270 p.
10. Некоторые вопросы прикладной акустики (ультразвук, гидроакустика) / Под ред. Ричардсона Н.Дж. М.: Военное издательство МО Союза ССР, 1962. 420 с.
11. *Цвиккер К., Костен К.* Звукопоглощающие материалы. М.: ИЛ, 1952. 160 с.
12. *Cox T.J., D'Antonio P.* *Acoustic absorbers and diffusers (theory, design, and applications)*. London: Spon Press, 2006. 405 p.
13. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Осипова Г.Л. и Юдина Е.Я. М.: Стройиздат, 1987. 558 с.
14. *Kuttruff K.H.* *Room acoustics*. 4<sup>th</sup> ed. London: Spon Press, 2000. 325 p.
15. Справочник по судовой акустике / Под ред. Ключкина И.И. и Боголепова И.И. Л.: Судостроение, 1978. 421 с.
16. *Никифоров А.С.* Вибропоглощение на судах. Л.: Судостроение, 1979. 184 с.
17. Авиационная акустика / Под ред. Мунина А.Г. и Квитки В.Е. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
18. Справочник по технической акустике / Под ред. Хекла М. и Мюллера Х.А. Л.: Судостроение, 1980. 438 с.
19. *Bell L.H.* *Industrial noise control: fundamentals and applications*. NY.: Marcel Decker, 1982. 428 p.
20. *Handbook of noise and vibration control / Ed. Crocker M.J.* Hoboken, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1570 p.
21. *Зверев А.Я.* Механизмы снижения шума в салоне самолета // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 4. С. 474–479.
22. *Astley R.J., Agarwal A., Holland K.R., Joseph P.F., Self R.H., Smith M.G., Sugimoto R., Tester B.J.* Predicting and reducing aircraft noise // *Proc. 14<sup>th</sup> Intern. Congr. Sound and Vibr. (Cairns, Australia, 2007)*. [https://acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/ICSV14/papers/p819.pdf](https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICSV14/papers/p819.pdf).
23. *Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М.* Научные основы создания упругих структур со специальными виброакустическими свойствами // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2014. № 5. С. 3–11.
24. *Захарьев Л.Н., Леманский А.А.* К задаче дифракции на “черном” теле // *РЭ*. 1969. Т. 14. № 11. С. 1930–1932;

- Рассеяние волн “черными” телами. М.: Советское радио, 1972. 288 с.
25. *Daniel E.D.* On dependence of absorption coefficients upon the area of the absorbent material // *J. Acoust. Soc. Am.* 1963. V. 35. P. 571–580.
  26. *Thomasson S.I.* On the absorption coefficient // *Acustica*. 1980. V. 44. P. 265–273.
  27. *Пауль Х., Фишер Р.* Поглощение света диполем // *УФН*. 1983. Т. 141. № 2. С. 374–381.
  28. *Bohren C.F.* How can a particle absorb more than the light incident on it? // *Amer. J. Phys.* 1983. V. 51. № 4. P. 323–327.
  29. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // *УФН*. 1967. Т. 92. № 3. С. 517–526.
  30. *Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R.* Controlling electromagnetic fields // *Science*. 2006. V. 312. № 5781. P. 1780–1782.
  31. *Leonhardt U.* Optical conforming mapping // *Science*. 2006. V. 312. № 5781. P. 1777–1780.
  32. *Бобровницкий Ю.И.* Импедансная теория поглощения звука: наилучший поглотитель и черное тело // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 6. С. 742–752.
  33. *Kirchhoff G.* *Mathematische Optic.* Leipzig: Druckund Verlag von B.G. Trubner, 1891. 280 p.
  34. *Baker B.B., Copson E.T.* *The mathematical theory of Huygen's principle.* 2<sup>nd</sup> edition. Oxford: Clarendon Press, 1969. 192 p.
  35. *Хенл Х., Мауэ А., Вестнфаль К.* Теория дифракции. М.: Мир, 1964. 428 с.
  36. *Macdonald H.M.* The effect produced by an obstacle on a train of electric waves // *Phil. Trans. of Royal Soc. (London). Serie A.* 1912. V. 212. № 10. P. 299–337.
  37. *Тютюкин В.В.* Моделирование звукопоглотителя, синтезируемого на основе механических резонаторов // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 5. С. 681–687.
  38. *Крынкин С.В., Тютюкин В.В.* Оптимизация характеристик звукопоглощающих материалов на основе резонируемых сред с тяжелыми включениями // *Акуст. журн.* 2002. Т. 48. № 4. С. 523–532.
  39. Эластомерные и композиционные материалы в шумопоглощающих судовых конструкциях / Под ред. Ионова А.В. СПб: Изд. ГНЦ РФ ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 180 с.
  40. *Уфимцев П.Я.* Дифракция электромагнитных волн на черных телах и полупрозрачных пластинах // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1968. Т. 11. № 6. С. 912–931.
  41. *Narimanov E.E., Kildishev A.V.* Optical black hole: broadband omnidirectional light absorber // *App. Phys. Lett.* 2009. V. 95. № 041106.
  42. *Rui-Qi Li, Xue-Feng Zhu, Bin Liang, Yong Li, Xin-Ye Zou, Jian-Chun Cheng.* A broadband omnidirectional absorber comprising positive-index materials // *App. Phys. Lett.* 2011. V. 99. № 193507.
  43. *Climente A., Torrent D., Sanchez-Dehesa J.* Omnidirectional broadband acoustic absorber based on metamaterials // *App. Phys. Lett.* 2012. V. 100. № 144103.
  44. *Wei Q., Cheng Y., Liu X.J.* Acoustic omnidirectional superabsorber with arbitrary contour // *App. Phys. Lett.* 2012. V. 100. № 094105.
  45. *Chang Z., Hu G.* Design of omnidirectional wave absorbers by transformation method // *App. Phys. Lett.* 2012. V. 101. № 054102.
  46. *Zheng L.-Y., Wu Y., Zhang X.-L., Ni X., Chen Z.-G., Lu M.-H., Chen Y.-F.* A new type of artificial structure to achieve broadband omnidirectional acoustic absorption // *AIP Advances*. 2013. V. 3. № 102122.
  47. *Naify C.J., Martin T.P., Layman C.N., Nicholas M., Thangawng A.L., Calvo D.C., Orris G.J.* Underwater acoustic omnidirectional absorber // *App. Phys. Lett.* 2014. V. 104. № 073505.
  48. *Elliott A.S., Venegas R., Groby J.-P., Umnova O.* Omnidirectional acoustic absorber with porous core and a metamaterial matching layer // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 115. № 204902.
  49. *Liang Y.-J., Chen L.-W., Wang C.-C., Chang T.-L.* An acoustic absorber implemented by graded index phononic crystals // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 115. № 244513.
  50. *Миронов М.А.* Распространение изгибающей волны в пластине, толщина которой плавно уменьшается до нуля на конечном интервале // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 3. С. 546–547.
  51. *Миронов М.А., Писляков В.В.* Одномерные волны в замедляющих структурах со скоростью распространения, стремящейся к нулю // *Акуст. журн.* 2002. Т. 48. № 3. С. 400–405.
  52. *Krylov V.V., Tilman F.J.B.S.* Acoustic “black holes” for flexural waves as effective vibration dampers // *J. Sound Vibr.* 2004. V. 274. P. 605–619.
  53. *Krylov V.V., Winward R.E.T.B.* Experimental investigation of the acoustic black hole effect for flexural waves in tapered plates // *J. Sound Vibr.* 2007. V. 300. P. 43–49.
  54. *Zhao Z., Conlon S.C., Semperlotti F.* Broadband energy harvesting using acoustic black hole structural tailoring // *Smart Materials and Structures*. 2014. V. 23. № 065021.
  55. *Conlon S.C., Fahline J.B.* Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black holes // *J. Acoust. Soc. Am.* 2015. V. 137. № 1. P. 447–457.
  56. *Yan S., Lomonosov A.M., Shen Z.* Numerical and experimental study of Lamb wave propagation in a two-dimensional acoustic black hole // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 119. № 214902.
  57. *Casimir H.B.G.* On Onsager's principle of microscopic reversibility // *Rev. Modern Phys.* 1945. V. 17. P. 343–350.
  58. *Visser M.* Acoustic black holes // *arXiv: gr-qc/9901047v1* 16 Jan 1999.
  59. *Liang B., Yuan B., Cheng J.C.* Acoustic diode: rectification of acoustic energy flux in one-dimensional systems // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. № 104301.
  60. *Maznev A.A., Every A.G., Wright O.B.* Reciprocity in reflection and transmission: what is a “phonon diode”? // *Wave motion*. 2013. V. 50. P. 776–784.
  61. *Popa B.-I., Cummer S.A.* None-reciprocal and highly nonlinear active acoustic metamaterials // *Nature Communication*. 2014. V. 5. № 3398.
  62. *Fleury R., Sounas D.L., Sieck C.F., Haberman M.R., Alu A.* Sound isolation and giant linear nonreciprocity in a compact acoustic circulator // *Science*. 2014. V. 343. P. 516–519.
  63. *Fleury R., Sounas D.L., Alu A.* A subwavelength ultrasonic circulator based on spatio-temporal modulation // *Phys. Rev. B*. 2015. V. 91. № 174306.
  64. *Karni S.* *Network theory: analysis and synthesis.* Boston, MA: Allyn and Bacon, Inc., 1966. 360 p.

65. *Бобровницкий Ю.И., Коротков М.П.* Резонансы неоднородных волн в протяженных упругих структурах // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 5. С. 872–878.
66. *Бобровницкий Ю.И.* Волна рэлеевского типа на плоской границе двух однородных жидких полупространств // *Акуст. журн.* 2011. Т. 57. № 5. С. 579–581.
67. *Вильде М.В., Каплунов Ю.Д., Коссович Л.Ю.* Краевые и интерфейсные резонансные явления в упругих телах. М.: Физматлит, 2010. 280 с.
68. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. Аграновича В.М. и Миллса Д.Л. М.: Наука, 1985. 528 с.
69. *Bobrovnikskii Yu.* Resonance of damping // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. V. 141. № 5. Pt. 2. P. 3645.
70. *Bobrovnikskii Yu.I., Tomilina T.M., Morozov K.D., Bakhtin B.N.* Potential of sound absorbers based on acoustic metamaterials // *Proc. 23<sup>rd</sup> Intern. Congr. Sound and Vibr.* (Athens, Greece, 2016). [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2016\\_icsv23/content/papers/papers/full\\_paper\\_825\\_20160530175723879.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_825_20160530175723879.pdf).
71. *Tomilina T.M., Afanasyev K.M., Bobrovnikskii Yu.I., Grebennikov A.S., Laktionova M.M., Makaryants G.M., Sotov A.V., Smelov V.G., Safin A., Vdovin R.* Testing of 3D-printed experimental samples of the metamaterial acoustic absorbers // *Proc. 23<sup>rd</sup> Intern. Congr. Sound and Vibr.* (Athens, Greece, 2016). [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2016\\_icsv23/content/papers/papers/full\\_paper\\_864\\_20160523182357340.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_864_20160523182357340.pdf).
72. *Tomilina T.M., Bobrovnikskii Yu.I., Bakhtin B.N.* Impedance design of efficient metamaterial sound absorbers // *Proc. 24<sup>th</sup> Intern. Congr. Sound and Vibr.* (London, UK, 2017). [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2017\\_icsv24/content/papers/papers/full\\_paper\\_1228\\_20170602183158834.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_1228_20170602183158834.pdf).
73. *Tomilina T.M., Grebennikov A.S., Laktionova M.M.* The development and experimental study of the sound absorbers made of acoustic metamaterials // *Proc. 24<sup>th</sup> Intern. Congr. Sound and Vibr.* (London, UK, 2017). [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2017\\_icsv24/content/papers/papers/full\\_paper\\_1232\\_20170531203439493.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2017_icsv24/content/papers/papers/full_paper_1232_20170531203439493.pdf).
74. *Vdovin R.A., Tomilina T.M., Smelov V.G., Laktionova M.M.* Implementation of additive Poly Jet technology to the development and fabricating the samples of the acoustic metamaterials // *Procedia Engineering.* 2017. V. 176. P. 595–599.
75. *Бобровницкий Ю.И., Морозов К.Д., Томила Т.М.* Импедансный подход к проектированию эффективных поглотителей колебательной энергии // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 2. С. 137–144.
76. *Бобровницкий Ю.И., Морозов К.Д., Томила Т.М.* Периодическая поверхностная структура с экстремальными акустическими свойствами // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 2. С. 147–151.
77. *Slater V.C.* Microwave electronics // *Rev. Modern Phys.* 1946. V. 18. № 4. P. 441–512.
78. *Yariv A.* Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides // *Electr. Lett.* 2000. V. 36. № 4. P. 321–322.
79. *Xu Y., Li Y., Lee R.K., Yariv A.* Scattering theory analysis of waveguide resonator coupling // *Phys. Rev. E.* 2000. V. 62. № 5. P. 7389–7404.
80. *Merkel A., Theocharis G., Richoux O., Romero-Garcia V., Pagneux V.* Control of acoustic absorption in 1D scattering by indirect coupled resonant scatterers // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 107. № 244102.
81. *Romero-Garcia V., Theocharis G., Richoux O., Merkel A., Tournat V., Pagneux V.* Perfect and broadband acoustic absorption by critically coupled sub-wavelength resonators // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. № 19519.
82. *Grobjy J.-P., Pommier R., Auregan Y.* Use of slow sound to design perfect and broadband passive sound absorbing materials // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 139. № 4. P. 1660–1671.
83. *Romero-Garcia V., Theocharis G., Richoux O., Pagneux V.* Use of complex frequency plane to design broadband and sub-wavelength absorbers // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 139. № 6. P. 3395–3403.
84. *Jimenez N., Huang W., Romero-Garcia V., Pagneux V., Grobjy J.-P.* Ultra-thin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption // *App. Phys. Lett.* 2016. V. 109. № 121902.
85. *Jimenez N., Romero-Garcia V., Cebrecos A., Pico R., Sanchez-Morcillo V.J., Garcia-Raffi L.M.* Broadband quasi perfect absorption using chirped multi-layer porous materials // *AIP Advances.* 2016. V. 6. № 121605.
86. *Chong Y.D., Ge L., Cao H., Stone A.D.* Coherent perfect absorber: time-reversed lasers // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105. № 053901.
87. *Song J.Z., Bai P., Hang Z.H., Lai Y.* Acoustic coherent perfect absorbers // *New J. Phys.* 2014. V. 16. № 033026.
88. *Bai P., Wu Y., Lai Y.* Multi-channel coherent perfect absorbers // *Europ. Phys. Lett.* 2016. V. 114. № 28003.
89. *Ng J., Chen H., Chan C.T.* Metamaterial frequency-selective superabsorber // *Optics Letts.* 2009. V. 34. № 5. P. 644–646.
90. *Tribelsky M.I.* Anomalous light absorption by small particles // *Europ. Phys. Lett.* 2011. V. 94. № 14004.
91. *Kapitanova P., Ternovski V., Microshnichenko A., Pavlov N., Belov P., Tribelsky M.* Giant field enhancement in high-index dielectric subwavelength particles // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 731.
92. *Valagiannopoulos C.A., Vehmas J., Simovski C.R., Tretyakov S.A., Maslovsti S.I.* Electromagnetic energy sink // *Phys. Rev. B.* 2015. V. 92. № 245402.
93. *Valagiannopoulos C.A., Simovski C.R., Tretyakov S.A.* Breaking the black body limit with resonant surfaces // *Europ. Phys. Lett. Appl. Metamat.* 2017. V. 4. № 5. P. 1–7.
94. *Olsen H.F., May E.G.* Electronic sound absorber // *J. Acoust. Soc. Am.* 1953. V. 25. P. 1130–1136.
95. *Baz A.M.* An active acoustic metamaterial with tunable effective density // *J. Vibr. and Acoust.* 2010. V. 132. № 1. P. 1–9.
96. *Popa B.-I., Zigoneanu L., Cummer S.A.* Tunable active acoustic metamaterials // *Phys. Rev. B.* 2013. V. 88. № 024303.
97. *Popa B.-I., Shinde D., Konneker A., Cummer S.A.* Active acoustic metamaterials reconfigurable in real time // *Phys. Rev. B.* 2015. V. 91. № 220303.