

Акустика вокруг нас

В. И. ДОЛГОВ

На вопрос: кто такой акустик, большинству обывателей придет на ум гидроакустик с подводной лодки, знакомый нам по многим фильмам. На этом представления об акустике у многих и заканчиваются, не считая, может быть, несознанных заключений о хорошей или плохой акустике в том или ином кинозале. А ведь современная акустика, начинавшаяся как наука о звуковых ощущениях человека, включает в себя столь широкий спектр направлений исследований, что требуется конкретизация, о какой области акустики идет речь.

Считается, что, как и большинство других основных наук, акустика ведет свое начало из древней Греции. Рациональность принятых древними греками акустических решений в различных сферах бытия, основанных на представлении звука как колебательного процесса, была впоследствии подтверждена наукой нашего времени. Греческий ученый и философ Пифагор, живший две с половиной тысячи лет назад, ставил различные опыты со звуками. Он впервые доказал, что низкие тона в музыкальных инструментах присущи длинным струнам, а при укорочении струны вдвое звук ее повысится на целую октаву. Однако истоки архитектурной акустики восходят к глубокой древности. Зодчие Ассирии, Вавилона, Древнего Египта в 5–2 тысячелетиях до н. э. строили храмы, обладавшие поразительными акустическими эффектами. Так как законы распространения и отражения звуковых волн они не могли знать, остается предполагать, что результат был достигнут опытом многих поколений. Первичным этапом развития акустики являлся экспериментальный метод, основанный на проведении опытов с реальными колеблющимися средами в конкретных условиях. Именно результаты этих экспериментов позволили сделать первые выводы о физической природе звука и закономерностях его излучения и распространения.

В конце дохристианской эры развитие акустики как экспериментальной части физики приостановилось. Считалось, что немалую роль в этом сыграл авторитет греческого ученого Аристотеля, который утверждал, что эксперимент недостойн внимания естествоиспытателя. Даже во времена Леонардо да Винчи пользова-

лись представлениями об акустике помещений, заимствованными из античного мира. И только в XIX в. из эмпирических представлений античного мира о звуке стали появляться точные знания и законы. Эйлер, Лагранж, Фурье, Стокс, Юнг, Гельмгольц, лорд Рэлей, Сэбин, Эйринг и многие другие ученые заложили начала акустики как науки. Теория о звуке стала развиваться как своеобразная механика упругих волн, в которой изучается поведение волн как самостоятельных объектов, в отличие от обычной механики, занимающейся поведением материальных тел. Дальнейшее бурное развитие акустики связано с совершенствованием измерительной техники, появлением мощных вычислительных средств, что привело к расширению области практических применений и задач исследований современной акустики. Однако ни в коей мере не следует забывать про наблюдение и опыт, с которых начиналось и продолжает развиваться познание.

Я тоже ранее не задумывался о механизме различных акустических проявлений в нашей повседневной жизни, так как по образованию – электромеханик по гироскопическим приборам. Работа моя была связана с экспериментами и разнообразными измерениями, среди которых были измерения импульсной вибрации и давления в ударной волне, относящиеся к акустическим измерениям. По-видимому, исходя из этого, в конце 1990-х гг., после моего прихода на работу в КБ-3, Станислав Васильевич Панкратов, в ту пору первый заместитель главного конструктора, предложил мне заняться вопросами исследований побочных акустических сигналов, неизбежно возникающих при работе любой аппаратуры в результате механических колебаний. Нобелевскую премию, которую он обещал за решение задачи, никто не ждал, однако стало понятно, что задача крайне важная и срочная, и параллельно с изучением акустических проблем необходимо привлечь подготовленных специалистов со стороны. Кроме создания теоретических моделей возникновения, излучения, распространения и приема побочных акустических излучений, требовалось провести большой объем экспериментальных исследований, для чего необходимо было закупить современное из-

мерительное оборудование. Денег в ту пору было немного, но не только во ВНИИЭФ, что неожиданно сыграло положительную роль: в работе с удовольствием приняли участие ученые нескольких известных институтов, имеющие нужный опыт. Работа включала широкий спектр исследований в нескольких областях акустики и даже радиофизики. Разработка теоретических моделей излучателя была связана с вопросами процессов звукообразования и звукоизлучения, изучения временной структуры и частотного спектра побочных акустических излучений. Процессы распространения и преобразования звука рассматривались для различных вариантов расположения источника на открытом пространстве и в помещениях с позиций волновой и статистической теорий акустики. А теория оптимального приема сигналов и теоретические модели оптимальных приемников, детально разработанные в радиофизике, могли быть применимы для различных видов акустических сигналов. Несмотря на различную природу возникновения электромагнитных и акустических полей, волновой характер их распространения предопределяет схожесть возникающих эффектов (наличие ближних и дальних зон излучения и т. д.). К тому времени в КБ-3 уже сложилась научная школа в области радиофизики и радиоэлектроники, признанным лидером которой был доктор технических наук, профессор Анатолий Иванович Астайкин, человек широчайшего кругозора и эрудиции. В результате совместной работы с Анатолием Ивановичем, многочисленных и длительных обсуждений результатов исследований для себя я почерпнул многое не только в научном, но в философском и житейском плане.

Знакомство с акустическими законами невольно привлекло мое внимание к проявлению и использованию акустических эффектов в природе. За последние годы в составе сложившейся группы путешественников мне довелось посетить различные города и области России. Карта проведенных путешествий – от Карелии до Приморья, включая Кавказ, Урал, Алтай, а также многие города средней полосы. В число объектов посещения вошли множество музейных объектов, монастырей и храмов с их колокольными звонами, концертных залов органной музыки. Удивительный мир акустики становился мне еще более близок и понятен.

В Калининграде во время посещения форта № 11 Денхофф мы обратили внимание на нишу в стене с полукруглым сводом и задней стенкой в одном из коридоров (потерны) вблизи склада

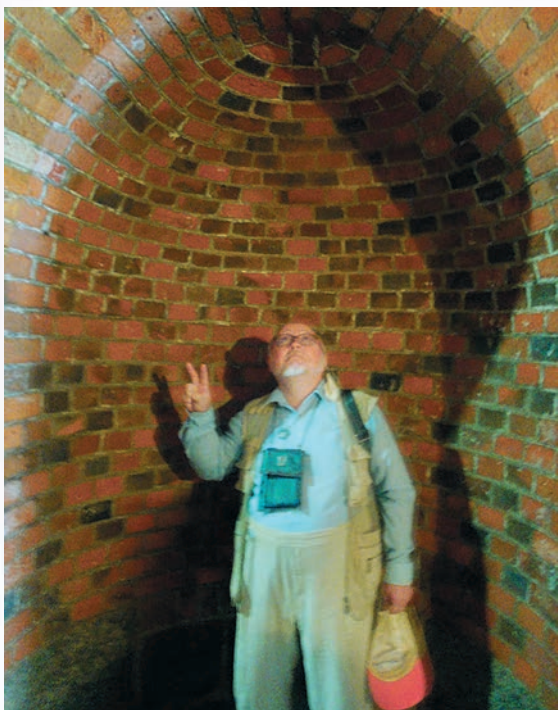


Вход в форт Денхофф



Центральный коридор форта Денхофф

боеприпасов и выхода на артиллерийскую позицию. Наличие ее на первый взгляд не было вызвано никакой военной или бытовой необходимостью, в описании форта про нее ничего не говорилось. Опытный экскурсовод, однако, знал назначение этой ниши: во время осады форта при темных коридорах, встав в определенную точку в этой нише, можно было услышать звуки неприятеля, проникшего в центральный коридор. Предусмотрительные архитекторы форта создали необычную систему резонаторов, состоящую из длинного центрального коридора-волновода, в нем также длинный боковой коридор с нишей на определенном расстоянии. Мы убедились, что встав в нишу на определенной высоте, поведя головой влево-вправо, взад-вперед, в какой-то момент резко ощущаешь в ушах появление далеких внешних звуков. Известно, что резонатором в акустике может служить натянутая струна, открытый или закрытый объем, например, в виде цилиндра (трубы), пластинка, закрепленная с одного конца, камертон и т. д. В резонаторе возбуждаются колебания даже от сравнительно слабых звуковых волн, падающих



Акустическая ниша-резонатор

на него. Резонатор собирает рассеянную в пространстве энергию, или усиление происходит за счет уменьшения продолжительности колебаний. Например, пещера с узким наружным входом может служить резонатором. Он усиливает звуки особенно низких частот; туристы и спелеологи знают, как сильно отдаются удары грома в подобных пещерах. Однако для осуществления резонанса совсем не обязательно иметь узкий и длинный вход. Резонатором может служить любая достаточно глубокая ниша, пусть даже одинакового поперечного сечения, как в нашем случае. Дальняя, примыкающая к жесткой стенке часть ее служит упругостью, а объем, граничащий с наружным пространством, – массой. Переход от массы к упругости здесь более плавный, чем в колбообразном сосуде.

В Кафедральном соборе Калининграда 11 лет назад был установлен малый орган, а спустя почти год – большой. Последний считается самым крупным в России и одним из самых крупных в Европе, а вместе они образуют уникальный органный комплекс, аналогов которому нет на всех необъятных просторах нашей родины. Труб в двух инструментах более восьми тысяч, за главным органом для размещения труб сделан целый трехэтажный дом. Органная труба представляет собой четвертьволновой резонатор, из набора собственных частот сильнее всего выражена первая мода колебаний.

Орган – стационарный музыкальный инструмент, он всегда строится для определенного помещения и, как никакой другой инструмент, зависит от его акустики. В свою очередь, зал, в котором предполагается установка органа, должен строиться или реконструироваться под будущий орган и соответствовать определенным правилам архитектурной акустики. Орган должен располагаться по центральной оси зала на возвышении над сценой и быть свободно стоящим инструментом по меньшей мере с трех сторон. Над органом должно оставаться свободное пространство для выхода звука труб, а выше органа должно быть расположено достаточное количество звукорассеивающих элементов (сложный профиль потолка, декор разных масштабов и др.). Однако звучание большого органа в королевском дворце Кенигсберга не произвело сильного впечатления. Очень интересно было бы послушать оба органа одновременно под управлением одного музыканта (такой режим предусмотрен). Но по всем канонам органист должен находиться вблизи органа, чтобы «чувствовать» его. Непонятно, как два инструмента, расположенные далеко друг от друга, могут создать пространственную слитность их звучания при совместной работе в таком большом зале.

Образец хорошего органного зала увидели в Белгороде. Немецкий инструмент, купленный на средства местных фермеров, размещенный в относительно небольшом зале с классическими



Малый орган Кафедрального собора Калининграда

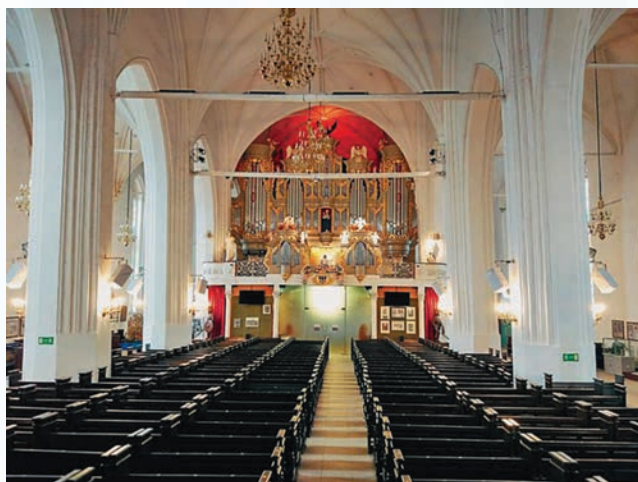
пропорциями и геометрией, порадовал звучанием и отношением к нему хозяев. Под креслами в рядах размещено множество кондиционеров, поддерживающих температуру в зале около 18–20 °С, что способствует стабильности звука. Татарин Хабибуллин (так он нам представился), на немецком инструменте «сбацал» нам русскую народную песню. А после по нашей просьбе исполнил гимн России, который мы, конечно, слушали стоя.

Следует сказать, что качество звука может зависеть от количества и размещения слушателей, особенно в большом зале. Однажды одному из знакомых ученых-акустиков руководство поручило помочь с проблемой плохого звука в одной из подмосковных церквей. Оказалось, что при расчетном числе прихожан в 2000 человек, службы посещали одновременно не более 500. Рекомендация была следующей: поскольку архитектуру храма менять нельзя, необходимо добиваться его заполнения, в противном случае без использования распределенной системы озвучивания не обойтись.

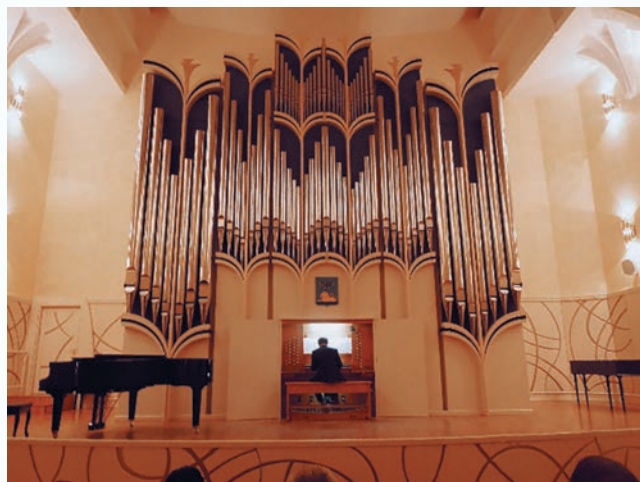
Непременный атрибут монастырей – колокола. Хотя основное назначение колоколов при монастырях – созывать народ в храмы, они могли служить также эффективным средством передачи информации, выразителями чувств скорби и радости. Ряд исследователей древних колоколов полагают, что они зародились в Китае, за более чем 1500 лет до Рождества Христова. На Руси колокола появились с пришествием христианства – из Византии, в которую они попали еще ранее из Европы. В русских летописях первые упоминания о колоколах относятся к 988 г.; колокола были привозными. Лишь в 1579 г. в Новгороде появился литейный завод, на ко-

тором стали лить колокола. Развитие русского литейного искусства позволило создать непревзойденные в Европе колокола: Царь-колокол 1735 г. (208 тонн), Царь в Троице-Сергиевой лавре 1748 г. (64 тонны, уничтожен в 1930 г.).

Ранняя технология отливки колоколов и технология, которая используется сейчас, отличаются только качеством используемой оснастки, материалов формовки и более продвинутым уровнем исследований в области литья. Еще в древнем Китае был получен оптимальный сплав, эффективно преобразующий энергию удара в звук, в нем должно быть 80 % меди и 20 % олова; язык же колокола изготавливается из железа. Колокол по сути своей является струной (или набором струн), но замкнутой. Правильный колокол – это небольшой оркестр, почти струнный квинтет. Музыкальной основой звука колокола являются нижние и средние обертона. Самый низкий тон колокола – это унтертон или тон гудения. Он возникает не сразу, а по мере возбуждения звуковых колебаний всего колокола и длится дольше всех. Принято, что высота этого тона рассчитывается по формуле Хладни: $F \sim T / (D^2 \sqrt{E/p})$, где: F – частота звучания, T – толщина, D – диаметр, E – модуль упругости (модуль Юнга), p – плотность материала колокола. Основной тон различается с первым примерно на октаву вверх. По нему определяется основная тональная принадлежность всего звучания колокола. Есть еще одно важное понятие, влияющее на звук колокола – это мензура, то есть зависимость толщины стенки профиля от общего диаметра, существенно влияющая на высоту и качество звука. Известно, что звучание колоколов зависит от трех основных исходных параметров: это качество сплава колокольной



Большой орган Кафедрального собора Калининграда



Орган в Белгороде



Большой Благовестный колокол Саввино-Сторожевского монастыря (1671 год)

Современный Большой колокол Саввино-Сторожевского монастыря

бронзы, профиля, положенного в основу построения стенок колокола, и точного соблюдения геометрических параметров колокола как тела вращения, стремящегося к идеалу как по горизонтали, так и по вертикали, что обеспечивает мощное и продолжительное звучание. Практики современного российского колокольного литья утверждают, что некоторые изменения в составе и технологии приготовления колокольного сплава ведут к отклонению в звуке колоколов одного и того же веса и формы порой до целого тона. Одним из главных факторов, определяющих звучание колокола, является его профиль. Мастера создают профиль, основываясь более на старую практику (путем обмера сохранившихся удачных колоколов) и на собственный опыт; обычно мастера держат профиль своих колоколов в секрете.

Примером удачных подборов колоколов были знаменитые ростовские колокола и звоны, звоны Саввино-Сторожевского монастыря в Звенигороде, в котором нам тоже довелось побывать. В 1668 г. мастера Пушкарского приказа под руководством государева пушечных и колокольных дел мастера Александра Григорьева отлили самый знаменитый колокол Саввино-Сторожевского монастыря – Большой Благовестный колокол весом более 2125 пудов (около 35 тонн). Отливка колокола предпринималась дважды – первая попытка в 1667 г. была неудачной. Всего работы по отливке продолжались 130 рабочих дней. Однако поднят на колокольную Благовест-

ный колокол был только 27 ноября 1671 г., так как долгое время не могли найти мастеров для выполнения этой работы. Поверхность колокола девятью рядами покрывала надпись, нижние три строки занимала тайнопись, составленная царем Алексеем Михайловичем. Из расшифрованного в 1822 г. текста тайного письма следовало, что Благовестник был отлит в знак особого расположения царя к монастырю. Колокол обладал необычайно глубоким и красивым звоном, равного которому в России не было. Глубокий и певучий плыл малиновый звон на десятки верст вокруг, достигая даже Москвы (а это 70 км).

Чудо-колокол, к сожалению, не уцелел до наших дней – в 1941 г. он был сброшен с ко-

локольни и переплавлен. Взамен утраченного Большого Благовестного колокола в 2003 г. на литейном заводе в Воронеже был отлит новый большой колокол (37 тонн). Во время экскурсии по Саввино-Сторожевскому монастырю в Звенигороде нам удалось подняться на звонницу, где установлен этот колокол. Позвонить не разрешили: для этого в монастыре есть четыре звонаря. Нынешний колокол слышен «всего» на 10 км. То ли прежний был подвешен ниже, то ли современная застройка вокруг мешает, а скорее всего, не удалось повторить из-за отсутствия обмеров и профилей оригинала. Кроме того, при осмотре колокола на внутренней поверхности в одном месте мы увидели следы довольно грубой выборки металла. Экскурсовод подтвердила, что колокол подтачивали, видимо, пытались исправить какие-то дефекты звучания. Таким образом, даже современное производство не гарантирует должного качества звука колокола.

Колокол – это неповторимое слияние физики и лирики, веры и искусства. Нас уверяют, что современные колокола могут быть созданы инженерами на основе сложных математических расчетов. Однако, по признанию самих колокольных мастеров, никогда колокола не звучат так, как их спроектировали. Здесь еще предстоят серьезные исследования в области металлургии и физической акустики.

ДОЛГОВ Валерий Иванович –
канд. техн. наук, главный специалист КБ-3