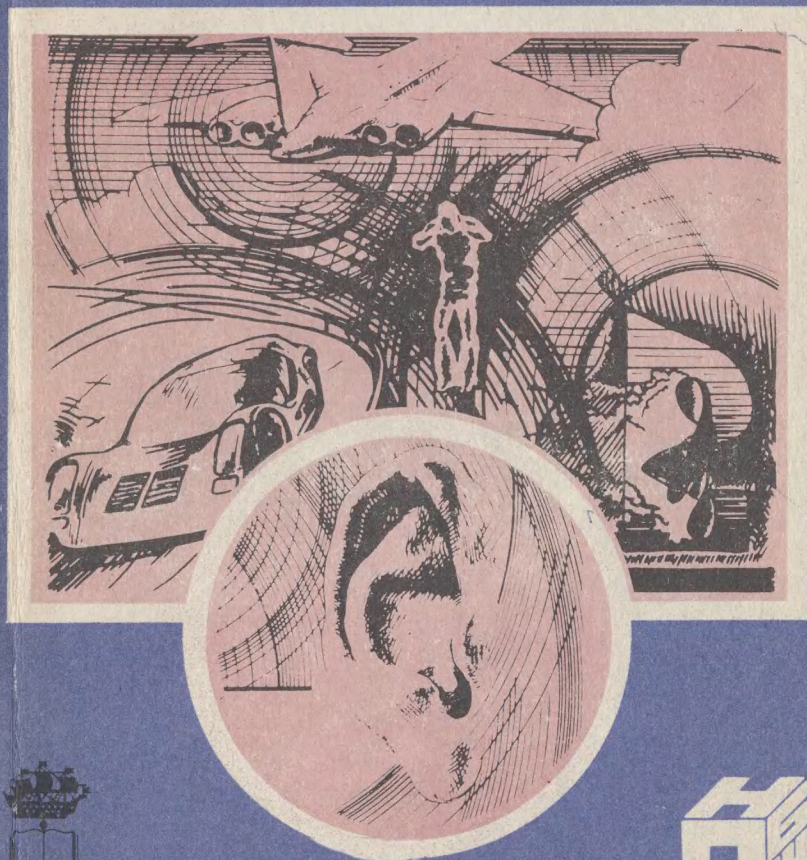


И. И. КЛЮКИН

Удивительный мир звука



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

И. И. КЛЮКИН

Удивительный мир звука

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ



ЛЕНИНГРАД
«СУДОСТРОЕНИЕ»
1986

22.32
К 52
УДК 534

Рецензент — чл.-кор. АН СССР В. В. Богородский

Клюкин И. И.

Удивительный мир звука. 2-е изд., перераб. и доп.— Л.: Судостроение, 1986.— 168 с. (Научно-популярная библиотека школьника).

Первое издание этой книги, написанной известным акустиком профессором И. И. Клюкиным, вышло в 1978 году и было тепло встречено читателями.

Из нового издания книги читатель узнает об истории акустики начиная с древнейших времен, об аэро-, гидро- и геоакустике, и амбиофонии, о диалогах человека с машинами, о парадоксах действий с акустическими единицами и своеобразных явлениях на границах акустических сред; о том, является ли резонатор усилителем или поглотителем звука; о неожиданных «бытовых» последствиях дифракции и интерференции звука, о светомузыке и музыкопее.

Книга рассчитана на широкие круги читателей.

К 3605030000—033 46—86
048[01]—86

22.32

© Издательство «Судостроение», 1978 г.
© Издательство «Судостроение», 1986 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Впервые книга была издана в 1978 г. и вызвала большой интерес читателей. В письмах, поступивших в адрес издательства, содержалась просьба о переиздании книги, а также пожелания дополнить ее интересными практическими сведениями о звуковых явлениях.

Области применения акустических колебаний непрерывно расширяются. Однако едва ли они где-либо так многообразны, как в судовождении и судостроении. Это — эхолотирование и поиск подводных объектов, контроль толщины и качества стальных листов и ультразвуковая очистка, резка и сварка, и еще многое, многое другое. Часто, впрочем, — когда идет речь об уменьшении шума и вибрации, — борьба с акустическими колебаниями имеет не меньшее значение, чем их полезное применение.

Книга расскажет читателю об истории акустики начиная с древнейших времен, об аэро-, гидро- и геоакустике, о беспроводной телефонии, о соревновании стерео- и амбиофонии, о парадоксах действий с акустическими единицами и своеобразных явлениях на границах акустических сред; о том, является ли резонатор усилителем или поглотителем звука; о неожиданных «бытовых» последствиях дифракции и интерференции

звука. Как развиваются ультразвуковые дефектоскопия металлов и технология обработки, гидроакустическое эхолотирование, борьба с обрастаниями судов акустическими методами? Зачем нужна акванавту «гелиевая речь», что такое форманты? Как сделать колебания видимыми, что сулит светомузыка человеку, нужна ли борьба с «отходами цивилизации» — интенсивными шумами? Какова роль акустики в освоении Мирового океана? Что общего между утренним пением мемнонского колосса и колебанием трубопровода паровых котлов, не повинен ли инфразвук в появлении «летучих голландцев»? Обо всех этих и многих других вопросах узнает читатель.

Отзывы и пожелания следует направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».

Мир, в котором мы живем, удивительно склонен к колебаниям... Колеблются даже атомы, из которых мы состоим.

Р. Бишоп



ФИЗИЧЕСКАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

ОТ ИСТОКОВ АКУСТИКИ К НАШИМ ДНЯМ

Высшее научное обобщение признает открытие неизменных количественных соотношений между явлениями своею главной целью.

Пифагор

Не обладая слухом, мы едва ли много больше интересовались бы колебаниями, чем без глаз — светом.

Рэлей

Мы живем на дне воздушного океана и окружены звуками — механическими колебаниями, распространяющимися в любой упругой среде. Воздушная среда нам нужна не только как средство существования и защиты от губительных космических излучений, но и как звукопровод, позволяющий людям принимать сигналы опасности, информацию о местонахождении и перемещении живых и неживых объектов, следить за изменением их состояния, за многими природными явлениями, постигать тайны и радости областей искусства, связанных с гармоническими звуками.

Неудивительно поэтому, что человечество с давних пор стремилось познать акустические явления, их природу. Откуда же исчислять начало акустики, где ее истоки? Может быть, со времен И. Ньютона, посвятившего вопросам акустики один из разделов своего капитального труда «Математические начала натураль-

ной философии» (1687 г.; позже Лагранж назовет этот труд «величайшим из произведений человеческого ума»)? Ньютон разработал основы волнового движения в средах, вывел формулу скорости звука в них, установил понятие длины волны, считал акустику одним из разделов механики. «И в этом состоят главнейшие акустические явления» — такой скромной фразой Ньютон закончил этот раздел Начал.

Но еще до Ньютона важнейшие исследования в области распространения волн произвел Х. Гюйгенс (классический принцип Гюйгенса и сейчас исправно служит акустикам), в области колебаний струн важные работы выполнил М. Мерсенн. До них были и другие исследования, и прежде всего Галилея. В трактате «Пробирищик» (1623) он рассматривал получение звука с помощью колеблющихся тел, явление резонанса, акустические интервалы. Эти исследования вызвали восхищение Декарта. Но они ли корни, первоначальные истоки акустики?

Нет, для этого нам надо сразу перенестись на стык между V и VI веками до нашей эры — к Пифагору Самосскому, принадлежавшему к италийской философской школе, «мужу, умудренному безмерным познанием», как говорил о нем один из наставников Платона. Мы знаем Пифагора как автора его знаменитой геометрической теоремы. Но, как пишет древнегреческий историк Диоген Лаэртский (не путать с более известным Диогеном из кинической философской школы), Пифагор «...открыл разметку монохорда» — придуманного им устройства, состоящего из натянутой на деку струны с передвижными колками. Он первый разработал учение, в котором утверждалось, что «о музыкальных интервалах правильнее судить рассудочно, на основании чисел, чем чувствительным путем, посредством слуха». Было выяснено, что длина струны, издающей октаву, в два раза меньше длины струны, издающей основной тон, развито понятие консонансов (созвучий), выявлены три созвучия: кварта, квинта, октава. Это ли не зачатки музыкальной акустики?

Прошло два века, и ученик Аристотеля Аристоксен — музыковед (греческий термин), находившийся под влиянием пифагореизма, написал трактат о гармонике (гармонии). О том, как высоко ценилась музыка у греков, говорят и слова одного философа, обращенные к человеку, который не знал ни музыки, ни

естественных наук, но хотел стать учеником: «Ступай прочь, тебе не за что ухватить философию». Биограф Пифагора Порфирий пишет: «...песнями, напевами и лирной игрой он унимал и душевные недуги и телесные; этому он научил и своих друзей...». Значит, была уже известна и целебная роль музыки. Не чужд был Пифагор и идеалистических увлечений. Так, он связывал музыкальную гармонию с некоей «гармонией небесных сфер». Идеализм некоторых пифагорейцев невольно умиляет, когда читаешь, что если задеть одну струну, то другая также звучит «... благодаря некоторому родству и симпатии» *.

Первые сведения о физической природе звука относятся тоже к V веку. Ученые Архелай и Зенон, принадлежавшие к различным философским школам и разделенные друг от друга громадным расстоянием, указывали, что звук — это процесс сотрясения воздуха. Наиболее яркую формулировку акустического процесса мы находим у Хрисиппа во второй книге его «Физики»: «Слышание совершается оттого, что воздух между слушателями и звучащим предметом колеблется кругами, а затем расходится волнами и достигает уха наподобие того, как вода в водоеме расходится круговыми волнами от брошенного камня». Диоген Вавилонский (еще один Диоген, а всего их известно не менее семи) в учебнике «О звуке» также характеризует звук как сотрясение воздуха или же предмет звукового ощущения.

Некоторым эти качественные представления могут показаться примитивными. Однако достаточно вспомнить высказывания физиков XVI — XVII веков нашей эры (почти через тысячелетие!), чтобы убедиться в прогрессивности стихийно-материалистических воззрений древних эллинов. Теория Декарта о флюидах была в определенной мере возвратом к оккультизму, да и сам великий Галилей оказался достаточно далеким от материалистических взглядов, когда, рассматривая запах, вкус, звук, говорил, что «...если убрать ощущающее животное, то будут устранены и уничтожены все эти свойства» **.

* Дорфман Я. Г. Всемирная история физики. Т. 1. М.: Наука, 1974, с. 75.

** Льюиси М. История физики/Пер. с итальянского Э. Л. Бруштейна. М.: Мир, 1970, с. 71.

Итак, колыбель акустики — древняя Эллада, и об этой колыбели не следует забывать, как и о всякой колыбели.

А теперь впору окинуть хотя бы беглым взглядом, как развивалась акустика в посленьютоновские времена. Один из крупнейших математиков XVIII века Л. Эйлер, работавший в Петербургской академии наук, выполнил ряд важных исследований в области колебаний струн, мембран, пластин, работал над теорией музыки и музыкальных инструментов. Академик А. Н. Крылов кратко, но весьма ярко охарактеризовал его работы:

— Творчество Эйлера изумительно и в науке беспримерно.

Начало XIX века — поистине плодоносный период в изучении акустических явлений. В 1802 году немецкий ученый Э. Хладни выпустил фундаментальный труд «Акустика», в котором, в частности, рассмотрены различные источники звука, продольные волны в твердом теле, методы визуализации колебаний пластин (фигуры Хладни). Не имея современных частотомеров и анализаторов, он устанавливал верхнюю границу слышимости звука человеком — 22 000 колебаний в секунду, что довольно близко к действительности (впоследствии подобные исследования повторил Ф. Савар). Издание труда во Франции финансировал Наполеон. За Хладни утвердилось, как указывает один из историков физики, достаточно гордое имя «отца экспериментальной акустики».

П. Лаплас дополнил ньютоново выражение скорости звука поправкой на адиабатичность акустического процесса; С. Пуассон вывел трехмерное волновое уравнение. О. Френель, по образованию дорожный инженер, «переоткрыл» принцип Гюйгенса и дополнил его представления о когерентности элементарных волн и их интерференции (принцип Гюйгенса — Френеля, зоны Френеля на телах, подвергающихся процессу дифракции звука или света). Достойным завершением этого периода было определение в 1872 году Ж. Колладоном и Я. Штурмом на Женевском озере скорости звука в воде, оказавшейся близкой к 1,5 километра в секунду.

Такой же плодотворной была для акустики и последняя треть XIX века. Обращает на себя внимание колоритная фигура немецкого ученого Г. Гельмгольца. Военный врач («эскадронный хирург»), физик, матема-

тик, физиолог и всюду — исследователь, впоследствии первый президент основанного Сименсом имперского физико-технического института. О его работах в области физической акустики напоминают: изящная формула Кирхгофа — Гельмгольца, позволяющая определить звуковое поле сложных излучателей, теория резонаторов, первые анализаторы звука. Гельмгольц по праву считается и основателем физиологической акустики.

При первых же его исследованиях стало ясно, что интенсивность звука и его громкость не находятся в линейных отношениях (потребовалось, однако, еще более полувека, прежде чем Г. Флетчер смог получить свои кривые равной громкости). Выяснилось, что ухо не реагирует на фазовые отношения звуков, было расшифровано такое качество звука, как его тембр, установлены основные факторы речеобразования. Эти данные Гельмгольца, помимо всего прочего, содействовали изобретению телефона (Г. Белл) и фонографа (Т. Эдисон). Впоследствии венгерский физик Г. Бекеша блестяще завершил исследования Гельмгольца по физиологии слуха, разработал ряд инструментов для исследования слуховых органов, сконструировал динамические модели внутреннего уха, за что был удостоен Нобелевской премии.

В 1874 году увидела свет весьма важная для акустиков книга молодого русского ученого, в дальнейшем профессора Московского университета Н. Умова «Уравнения движения энергии в телах». Ее цель — «раскрытие общей связи между распространением и движением энергии в средах и перемещениями их частиц независимо от частных форм движения». Как видно, задача поставлена в самом общем виде, решение ее справедливо как для жидких и газообразных, так и для твердых тел. Умов, в первую очередь, относил свой анализ к механической (звуковой) энергии в жидких средах и твердых упругих телах.

Несмотря на то что основное содержание работы Н. Умова было в том же году издано на немецком языке, она не получила достаточного распространения; о ней вспомнили, по существу, лишь после открытия Д. Пойнтингом закона движения электромагнитной энергии в средах. Впрочем, историки физики четко зафиксировали приоритет Умова. Так, в книге известного немецкого историка науки Ф. Ауэрбаха «История

развития современной физики» (1910) можно прочесть: «Направление, совпадающее с направлением распространения волны, т. е., короче говоря, луча, есть направление вектора энергии, т. е. направление, в котором движется энергия (Умов — 1874, Пойнтинг — 1884)» *.

В немецкой математической энциклопедии в статье А. Фосса «Принципы рациональной механики» прямо указывается: «В самом общем виде еще Умов в 1874 г. развил проблему движения энергии в жидких средах и упругих телах». Затем автор приводит вывод уравнений движения энергии для жидкостей и ссылается при этом на работы Н. Умова (1874) и В. Вина (1892). Далее упоминается, что «...Пойнтинг развил аналогичные формулы для электромагнитного поля...».

В 70-е же годы английский физик Рэлей (Дж. Стрэтт) завершил и издал свой капитальный двухтомный труд «Теория звука». Количеству, широте и глубине решенных в нем задач можно лишь подивиться. Столетие, прошедшее со времени первого издания этой монографии, не состарило ее, и она по-прежнему остается настольным руководством для акустиков.

В 1880 году Пьер и Жак Кюри открыли пьезоэффект, который сыграл (и, разумеется, играет до сих пор) столь значительную роль в вопросах создания акустических излучателей, приемников звука и вибрации.

«Под занавес» XIX века американский физик В. Сэбин начал свои новаторские работы по архитектурной акустике. Он нашел закон, связывающий время послезвучания в помещении с поглощением звука в нем, и вывел соответствующие математические зависимости. Его именем названа единица звукопоглощения.

Что же сказать об акустике XX века? Она разрослась до громадных размеров, акустикой на земном шаре ныне занимаются многие, многие тысячи людей. Произошла ее специализация по областям и направлениям. Границы этих областей, впрочем, часто расплывчаты, и четкой классификации пока не создано. Существует разделение акустики: по природным средам — атмосферная акустика, гидро- и геоакустика;

* Здесь и далее приводятся выдержки из книги Д. Д. Гуло «Н. А. Умов». М.: Просвещение, 1977, с. 75.

по областям анализа и использования — физическая акустика, прикладная, промышленная, физиологическая, музыкальная, биоакустика и даже психоакустика; по принципу комбинирования направлений — электроакустика, строительная и архитектурная акустика, акустоэлектроника, оптоакустика и акустооптика; по уровням структуры вещества, на котором анализируются акустические явления, — молекулярная акустика, квантовая и т. д., и т. п.

Нет никакой возможности в небольшой книге осветить хотя бы бегло все вопросы и достижения современной акустики в различных ее областях. Ограничимся сравнительно небольшим кругом этих вопросов, с которыми автору в той или иной степени приходилось иметь дело, или тех, которые кажутся ему наиболее интересными для читателя, обратившегося к этой области физики.

ЗВУКИ В ВОЗДУХЕ

...атмосфера является почти универсальной средой, в которой протекают звуковые явления...

Рэлей

Человечество с давних пор стремилось среди прочих свойств атмосферы познать ее акустические свойства. Доступными каждому средствами, путем наблюдений разницы во времени между появлением молнии и звуком грома оценили, что скорость распространения звука в воздухе относительно невелика.

Значение скорости звука в воздухе вблизи от поверхности Земли оказалось чуть больше трети километра в секунду. Скорость, по теперешним космическим временам, явно небольшая. А по мере увеличения расстояния от поверхности Земли, ввиду падения атмосферного давления, плотности и температуры воздуха, от которой также зависит скорость звука, последняя претерпевает значительные изменения. Для сравнения с другими средами укажем, что скорость звука в воде, как упоминалось, примерно 1,5 километра

в секунду, в металлах — 5 километров в секунду, а в породах земной мантии — 7 километров в секунду и более.

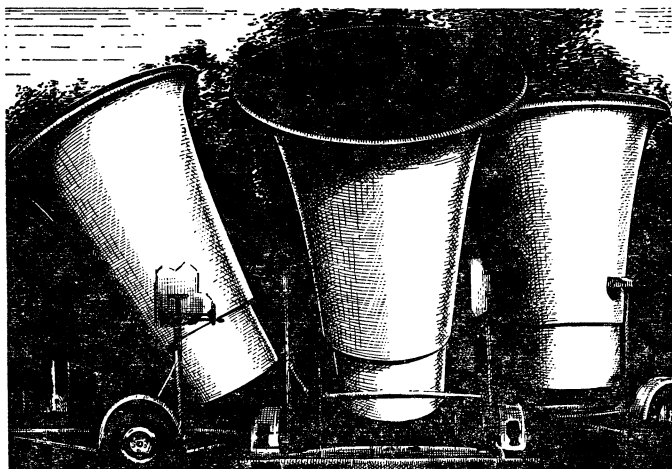
В наше время в больших масштабах развернуты исследования как акустических, так и иных свойств атмосферы и происходящих в ней природных явлений акустическими методами.

Продолжают привлекать внимание акустические характеристики грома. Максимальные спектральные звуковые составляющие в ударах грома находятся, по данным одних исследователей, в диапазоне частот 50—150 герц, по сведениям других, достигают 400—500 герц. Сила звука, то есть количество звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади фронта волны, в 10^{15} и более раз превышает силу звука человеческого голоса. Подобные звуковые энергии зарегистрированы еще лишь при сильных извержениях вулканов. При ядерных взрывах, несомненно, возможны и еще более сильные звуковые волны.

А что сказал бы читатель о «шумовом кольце» в атмосфере, кольцо, диаметр которого может достигать диаметра Земли? По-видимому, пока ничего существенного, так как первое сообщение о подобном явлении появилось с десятков лет назад, и его продолжают обсуждать специалисты. Назвали же его так и доложили о нем французские акустики Берте и Рокар, исследовавшие распространение звука в атмосфере при действии взрывных источников. Они обнаружили в верхних слоях атмосферы на высоте 90 километров звуковой канал, в котором создается высокая концентрация звуковой энергии с ярко выраженными нелинейными эффектами.

Наблюдались случаи распространения инфразвуковых волн на дистанцию до 14 000 километров, то есть на расстояние более трети земной окружности от места возбуждения звука. Шумовое кольцо, центр которого находился на одной вертикали с взрывным источником, расширяясь, ползло вокруг земного шара. В точке приема сигнал сильно растягивался во времени. Авторами была предложена теория шумового кольца.

Другие исследователи обнаружили резонансное взаимодействие различных звуковых волн, распространяющихся в пространстве. Оно также носит нелинейный характер и проявляется на частотах до нескольких

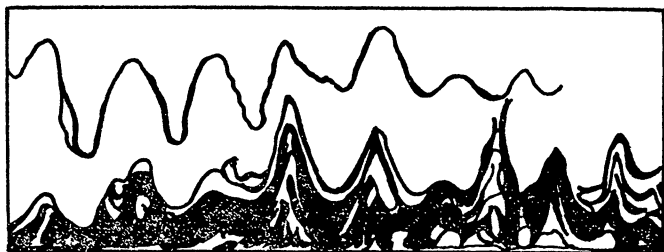


Излучатели — приемники звуковых импульсов, установленные в Гамбургском аэропорту и служащие для акустического зондирования атмосферы.

десятков герц. Довольно причудливую зависимость от частоты звука и высоты его распространения в атмосфере имеют величины километрового затухания звука.

Вообще нижний слой атмосферы (тропосфера) весьма неоднороден. В нем имеются слои с различной влажностью и температурой, области турбулентных вихревых движений, постоянные потоки газовых масс. Все эти факторы определяют погоду, климат и даже, как установили специалисты по морской акустике, ухудшают условия работы низкочастотных гидроакустических средств. Для определения неоднородностей атмосферы применялось (с переменным успехом) радиолокационное зондирование. Но вот заметили, что рассеяние акустических волн от турбулентностей в атмосфере в сотни и тысячи раз превышает рассеяние электромагнитных колебаний. Так родилось новое направление исследования тропосферы — ее акустическое зондирование, или акустическая эхолокация.

...Идут дни и ночи, проходят недели, а направленные вверх акустические излучатели непрерывно посылают звуковые импульсы и принимают эхо, отраженные неоднородностями атмосферы. Записи этих эхо



Слоистая структура атмосферы на различных высотах, записанная с помощью звуколокатора.

очень наглядны, иногда прослеживаются несколько находящихся один над другим неоднородных слоев атмосферы. Подобные установки действуют в США, Канаде, Индии и других странах. Это довольно солидные сооружения. Так, установка, созданная в Южной Австралии, включает в себя антенную решетку из восьми десятков динамиков с резонаторами; электрическая мощность звуковой частоты, подводимая к этим репродукторам, — около 10 киловатт. Приемная антенна представляет собой большое параболическое зеркало с рупором; для лучшей передачи улавливаемой энергии приемному микрофону оно помещено в отдельном углублении в грунте. Разрабатываются еще более совершенные системы со сканированием (разверткой) звукового луча по небосводу.

Звук может выступать в роли... термометра, причем именно в тех условиях, когда обычные термометры отказывают. На высоте более 30 километров молекул в атмосфере уже так мало, что погрешности традиционных термометров, использующих тепловое движение молекул, резко возрастают. В основу звукового термометра положена известная из теории и экспериментов зависимость скорости звука в разреженном газе от температуры газа. Оказалось, что такой термометр не только гораздо точнее, но практически абсолютно безынерционен. Он отмечает колебания температуры, длящиеся всего 0,05 секунды, что совершенно недоступно как ртутным, так и жидкостным термометрам. Будучи помещен на метеорологический шар-зонд, поднимающийся с довольно большой скоростью, звуковой термометр успевает фиксировать

все флюктуации температуры атмосферы на различных высотах.

Так что аэроакустическая техника не отжила свой век; несомненно, найдутся новые области ее практического применения и будут вскрыты многие неизвестные доселе явления в воздушной оболочке Земли.

ЗВУКИ В ЗЕМЛЕ

По преданию, Тифон Александрийский во время осады Аполлонии определял направление неприятельских подкопов с помощью подвешенных в траншее сосудов — резонаторов.

Подслушивание противника через землю — таким в течение многих веков было главное и, видимо, единственное применение подземного звука. Так было и в античные времена, и при осаде Казани Иваном Грозным, и во время первой мировой войны, когда зарывшиеся в землю друг против друга противники вели из своих траншей подкопы под вражеские батареи, склады, командные пункты. Пожалуй, чуть усовершенствовалась к этому времени техника, появились первые приборы — простейшие геофоны.

Один из главных природных врагов человека — землетрясения. Множество сейсмографов, раскиданных по всему свету, фиксируют любые подземные толчки. Некоторые из этих «сейсмосторожей» снабжены автоматикой. Так, неподалеку от Токио, в сейсмоопасном районе, где в год фиксируется много сотен подземных толчков, сейсмосторож, установленный у железнодорожного моста, связан со светофором на железнодорожном полотне. Когда сила толчка превысит установленную норму, на пути поездов зажигается запрещающий красный сигнал, а специальная бригада осматривает мост.

Властно заявила о себе другая область геофонии, связанная с изучением структуры коры Земли и земной мантии. Простейшая схема исследований здесь такова. В какой-либо точке производится взрыв углубленного в землю заряда, в других же точках, достаточно уда-

ленных от первой, принимаются звуковые сигналы — как пришедшие непосредственно от источника звука, так и отраженные от слоев различных пород.

Поистине, однако, скоро сказка сказывается, да не скоро дело делается. Очень трудно бывает разобраться в вакханалии принятых волн. К тому же, в отличие от газовых и жидких сред, в которых могут распространяться только продольные волны, твердой среде присущи еще различные типы поперечных и поверхностных волн.

Пожалуй, здесь, в этом многообразии колебательных движений, особенно отчетливо проявляется данное Энгельсом определение физики как механики молекул. И все же, учитывая различную скорость распространения волн по записям геофонов, удастся определить структуру слоев коры Земли и глубину нахождения мантии в данном участке.

Постепенно от взрывных источников переходят к электромагнитным и электродинамическим излучателям звука, в которых можно задавать частоту излучения. Применяются направленные источники колебаний, излучающие в узком секторе. Это не только экономит энергию, повышает точность измерений, но и, в случае звукового зондирования у морского дна (при этом звуковые волны переходят и в породы дна), уменьшает возможность гибели морских обитателей от интенсивных звуковых колебаний.

Впечатляющие результаты сейсмических исследований в Антарктиде. За какой-нибудь десяток-полтора лет изучены структура ее ледяного панциря и рельеф материка подо льдом, где обнаружены крупные горные цепи, впадины ниже уровня моря. Удалось даже установить, что строение антарктической платформы сходно со строением платформ Южной Америки, Австралии и Африки. При всех этих исследованиях применялось не только «прозвучивание» сред в горизонтальном направлении, но и эхозондирование — процесс, подобный эхолотированию в море и заключающийся в направленном излучении колебаний и приеме сигналов, отраженных от границ и неоднородностей среды.

Геоэхозондирование, звуковая геолокация получили за последние десятилетия широкое распространение для поиска каменного угля, железной руды и россыпных месторождений. Применение звуковой гео-

локации и сейсморазведки позволяет получить комплексную картину месторождений полезных ископаемых, существенно уменьшает объем дорогостоящих работ — бурения шурфов, которое ранее делалось почти вслепую, а теперь — целенаправленно.

А строительство инженерных сооружений, например плотин? Надо, допустим, определить размеры и конфигурацию скальной платформы, на которую будет опираться сооружение, — звуковая геолокация даст наглядную картину глубинных слоев в этом месте.

Даже археологи не избежали соблазна привлечь новые методы разведки. С помощью звуковой локации на дне Бугского лимана были определены контуры древней застройки и занесенных илом оборонительных сооружений античного городища Ольвии.

Простейший ультразвуковой эхолот с некоторых пор стал помощником золотодобытчиков, причем не в море, а на земле. При разработке дренажных котлованов очень важно бывает знать, сколько еще продуктивного золотоносного песка осталось в том или ином месте котлована и где черпаки драги достигнут пустой породы. Нужны достаточно мощные и направленные звуковые импульсы для того, чтобы проникнуть в слой рыхлого песка до подстилающего грунта и определить толщину слоя (а заодно и глубину его залегания). Подобный прибор приходит на золотых и платиновых приисках на смену дедовской маркшейдерской многометровой рейке или трубе, которую ранее старательно втыкали в донные слои различных мест котлована.

Обвалы в шахтах... Эти страшные события могут приводить к гибели людей, и давно уже во всем мире стали раздумывать, как предугадать возможное несчастье. Родилась мысль привлечь для этого сейсмоакустические методы и аппаратуру, значительно более чувствительную, чем человеческий слух, и способную объективно регистрировать подземные шумы в течение длительного времени.

Около четверти века назад один из видных советских акустиков М. С. Анцыферов, занимавшийся до того времени вопросами архитектурной и электроакустики, возглавил эту работу. В Институте горного дела имени А. А. Скочинского была организована соответствующая лаборатория, и начались регулярные акустические наблюдения в шахтах. Особое внимание обра-

тили на шахты Донбасса, где уже тогда угледобыча производилась на глубине до полукилометра. В настоящее время осваиваются глубины более километра, а ведь чем больше глубина, тем выше давление в пластах породы и, следовательно, тем больше вероятность опасных выбросов газа, угля и других сред.

Акустическая эмиссия. Этими словами специалисты сейчас обозначают звуки, которые предшествуют ряду механических явлений, например растрескиванию и разрушению металлов. Горные акустики изучали мощные звуковые сигналы, которые, как оказалось, начинает излучать порода, перед тем как в ней произойдут разломы и разрывы.

Спектр этих импульсов достаточно широк, наиболее интенсивные составляющие находятся в области частот 300—600 герц. Но вот беда: спектр шумов в породе при работе отбойных молотков и врубовых машин примерно таков же. Значит, надо измерять подземные шумы вдали от забоя, где производятся работы, а также в ночное и обеденное время.

Всегда ли мощные звуковые импульсы предшествуют выбросам угля и газа? Требуют ли они, эти импульсы, обязательного удаления шахтеров из забоя? Оказывается, не всегда. Были случаи, когда работа прерывалась, а динамических явлений в шахте не происходило. Автор как-то спросил М. С. Анцыферова, часто ли ему приходилось выступать поневоле в роли пастуха-лжеца из известной басни, которому впоследствии никто не верил. Он ответил:

— Бывало, конечно, и недоверие, и даже упреки за невыполнение плана по вине акустиков. Постепенно все сошлось на том, что лучше раз, и два, и три выйти из забоя, чем раз быть засыпанными. Но мы повысили точность своих прогнозов.

Какова же она сейчас? Накопленный опыт, использование разработанной горными акустиками системы статистических критериев повысили надежность текущего сейсмоакустического прогнозирования опасности динамических явлений в шахтах до 95—98 процентов. Более того, применение направленных систем геофонов дало возможность определять координаты очагов акустических импульсов, то есть, по существу, и очагов возможных подземных катаклизмов, больших и малых.

Службы производственного акустического прогнозирования подземных динамических явлений начали



Усиление уровня и увеличение количества звуковых импульсов, фиксируемое геофоном, служит сигналом опасности. Если не удалить людей из шахты, то возможна их гибель вследствие выброса угля и газов.

работать в шахтах Донбасса в 1965 году. В первый же год введения служб количество неожиданных динамических явлений сократилось в 3,5 раза, а через 5 лет — в 20 раз, хотя за этот период протяженность выбросоопасных зон в шахтах увеличилась вдвое вследствие перехода выработок на нижележащие горизонты.

Сейсмофоны в шахтах. Они, оказалось, могут служить не только для прогнозирования опасных сейсмических явлений. Телефонные линии, выведенные в некоторых шахтах непосредственно в кабинет главного инженера, позволяли ему узнавать, когда переставала работать та или иная угледобывающая машина.

Почему стали? — следует его строгий вопрос.

Неуютен труд шахтных акустиков. Ученые в комбинезонах и касках с лампочками шлепают по мокрым штольням, иногда ползают в них на коленях, отыскивая, где бы установить свои геофоны и усилители. Нет-нет, и крепкое соленое словцо шахтеров, которым помешали, сопровождает действия научных работников. Но наградой им служит сознание, что их работа сохранила жизнь не одному горняку.

Раз уж земная среда проводит звук, то можно не сомневаться, что подземная акустика найдет еще множество применений.

ЗВУКИ В ВОДЕ

Если ты, будучи на море, опустишь в воду отверстие трубы, а другой конец ее приложишь к уху, то услышишь идущие вдали корабли.

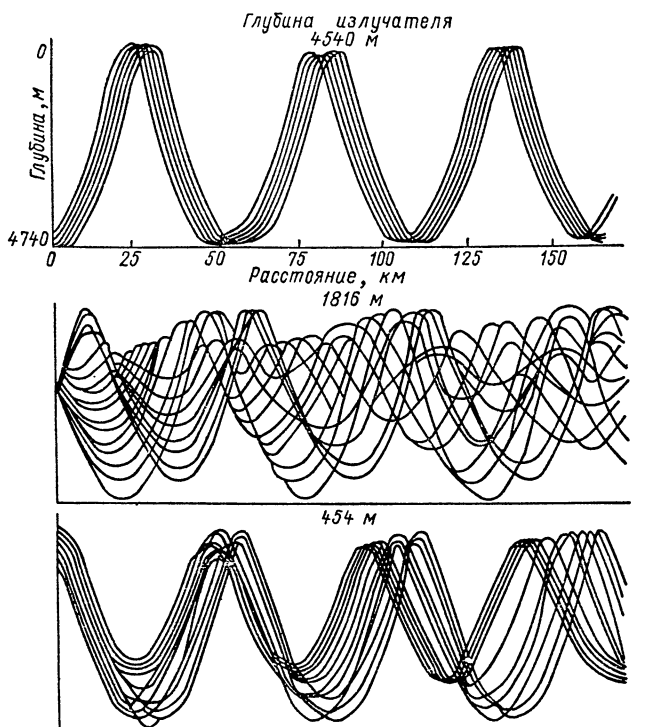
Леонардо да Винчи

Есть что-то удивительное в том, что почти полтысячелетия назад Леонардо предвосхитил первоначальное развитие гидроакустики как науки об обнаружении кораблей в море по звуку. Если не считать первых робких попыток эхолотирования, то гидроакустика в XX веке развивалась сначала как область военной науки и техники. Например, в России еще в 1905 году были разработаны совершенные по тому времени приборы для звуковой связи между погруженными подводными лодками. К 1916 году относится изобретение К. В. Шиловским и П. Ланжевенном первого гидролокатора.

В наше время, в период интенсивного освоения Мирового океана, гидроакустические приборы и методы достигли высокой степени совершенства, а области применения гидроакустической техники все расширяются.

Разумеется, проще всего было бы отослать читателя к соответствующим источникам, например к книгам автора по гидроакустике. Но из песни слова не выкинешь, а потому и в этой книге, где трактуются самые различные акустические вопросы, следует сказать несколько слов о звуках под водой, понимая под этим преимущественно звуки в больших природных водоемах. Начнем с краткого описания некоторых физических явлений при распространении звука в море.

Рефракция. Это, как известно, искривление лучей в среде с переменным показателем преломления.



Художник-орнаменталист, пожалуй, мог бы позаимствовать в картинах подводных звуковых лучей мотивы для своих работ.

Сплюснутая Луна, миражи в пустыне, плавающие в воздухе острова над морем — классические примеры оптической рефракции в воздухе. Акустическую рефракцию в воздухе заметить несколько труднее, но она тоже имеет место. А вот под водой звуковая рефракция проявляется в любое время года практически повсеместно.

У гидроакустиков есть хорошее mnemonicское правило: луч, подобно жаждущему человеку, устремляется в сторону более холодных и менее соленых слоев воды. Есть, правда, еще один фактор, который труднее втиснуть в рамки мнемоники. Это гидростатическое давление, зависящее от глубины. От его величины также меняется скорость звука, а следовательно, и показатель преломления. В данном случае его изменение таково, что звуковой луч стремится вверх.

Пожалуй, особенно отчетливо проявляется влияние температуры зимой, когда верхние слои морской воды более холодные, чем нижние. Луч тогда под определенным углом устремляется к поверхности моря, отражается от нее, постепенно затухая по мере удаления от источника звука. Траектория его напоминает цепь, подвешенную во многих местах к буйкам на поверхности моря. Условия подводного обнаружения звука в поверхностных слоях при этом достаточно хорошие.

В летнее время, когда более холодными являются глубинные слои, луч уходит в глубину. Образуются зоны акустической тени, в которых обнаружение подводных объектов затруднено. Возможны сопутствующие эффекты. На границе слоев с резким перепадом температуры может происходить полное внутреннее отражение, расщепление луча, когда небольшая часть звука проходит под слой скачка, а другая часть отклоняется кверху. Создаются не только «мертвые зоны», как иногда именуют флотские акустики зоны акустической тени, но и зоны фокусировки, усиления звука. В общем, картина распространения звука может быть очень пестрой.

Звуковые каналы. Совместное влияние температуры, солености воды, гидростатического давления может быть таким, что на определенной глубине расположится зона («горизонт») с минимальной скоростью звука. По этому горизонту, претерпевая лишь небольшие волнообразные отклонения, звуковой луч может распространяться на очень большие расстояния. Эта зона дальнего и сверхдальнего распространения звука условно названа звуковым каналом. Звуковой канал в океане был открыт американскими акустиками, а в глубоком море (Черном) — советскими учеными Л. М. Бреховских и Л. Д. Розенбергом.

Были отмечены случаи распространения звука взрыва небольшой бомбы по подводному каналу от берега Австралии до Бермудских островов, то есть на расстоянии, равном половине окружности Земли. Существуют карты глубин залегания устойчивого звукового канала в океанах. Во многих местах изолинии глубины залегания канала по земной поверхности имеют причудливые извилистые очертания.

Американский акустик Э. Гамильтон предсказал теоретическую возможность существования звукового канала также в осадочных породах, выстилающих дно океана. В 1974 году Р. Урик экспериментально подтвердил это.

Морская реверберация. Словом «реверберация», соответствующим английскому слову «эхо», обозначают более или менее продолжительное угасающее звучание звукового сигнала после излучения. В наибольшей степени это явление обычно связано с отражениями от скоплений газовых пузырьков, затянутых на некоторую глубину во время штормов или являющихся продуктом жизнедеятельности планктона. В мелководных районах реверберация может быть обусловлена отражением от каменистого дна. Реверберация иногда является серьезной помехой рыболокации и военно-морской гидролокации, так как она может маскировать принимаемый полезный эхосигнал.

Интересно наблюдать реверберацию, когда она достаточно интенсивна. Всплески ее то вспыхивают, то гаснут на катодном индикаторе локатора, порой на расстояниях в несколько километров. Синхронно с этим меняется звук реверберации в динамике. Это значит, что гидролокационная посылка встретила с каким-то отражающим звук скоплением, а затем проследовала далее.

Первая отечественная работа по реверберации моря появилась в Журнале технической физики в 1943 году, в самый разгар Великой Отечественной войны. Автором ее был военно-морской акустик В. С. Анастасевич. Трудно забыть впечатление, которое произвела эта статья на молодых акустиков. Неужели открытое море может звучать, как готический собор? И причина этому — какие-то пузырьки... (уже было известно, что пузырьки в воде могут поглощать звук, но о рассеивающих их свойствах мало кто знал). Исследования реверберации выполнялись Ю. М. Сухаревским. Впоследствии В. В. Ольшевский дал основы статистической реверберации.

Для борьбы с реверберационной помехой используют излучение в узком секторе, частотную модуляцию сигнала и другие приемы. В общем, если исключить малые расстояния от гидролокатора, реверберационная помеха оказывается не такой страшной,



«Эхолот пишет дно на 50 метрах. Но ты ступай осторожно: может быть, это — звукорассеивающий слой».

как «тривиальные» помехи морского волнения, а также помехи от шумов самого корабля, несущего гидролокатор.

Звукорассеивающие слои. Когда однажды исследователи-гидроакустики в одном из южных районов попробовали устремить луч гидролокатора вниз, то к своему удивлению обнаружили, что

дно океана «писалось» на глубине в несколько раз меньше действительной. Феномен «поднимающегося и опускающегося дна» отметили и специалисты по эхолотированию. Ясно было, что существуют какие-то мигрирующие слои, которые отражают звук, причем в большей мере, чем, например, водный слой с температурным скачком.

Брали пробы воды с глубины этих звукорассеивающих слоев, опускались в них в батискафе. Оказалось, что «призрак» морского дна, как и реверберация, связан с морскими организмами и продуктами их жизнедеятельности. Интересно, что каждый исследователь находил в отражающих слоях скопления раз-

личных организмов — от микроскопического биопланктона до медуз и даже более крупных существ.

Однако, кем бы ни были их «учредители», со звукорассеивающими слоями приходится считаться военно-морским акустикам, да и персоналу рыбопромысловых судов, ведущих гидроакустический поиск рыбы.

Из приведенного далеко не полного перечня гидроакустических явлений в море видно, сколь они разнообразны. Исследования распространения звука в морях и океанах во всех морских странах расширяются с каждым годом. В СССР подобные исследования с успехом выполнялись Н. С. Агеевой, И. Б. Андреевой, В. В. Богородским (в очень интересной области распространения звука — во льдах и подо льдами Арктики), Л. М. Бреховских, Р. А. Вадовым, В. П. Глотовым, В. С. Григорьевым, Ф. И. Кряжевым, В. И. Ильичевым, Ю. П. Лысановым и многими другими. Большой группой авторов под руководством академика Л. М. Бреховских создана капитальная монография «Акустика океана», удостоенная в 1976 году Государственной премии СССР. В 1977 году Л. М. Бреховских награжден золотой медалью имени выдающегося физика Рэлея.

Интересен анализ отражения звука от объектов произвольной формы. Публикации по этому вопросу не сходят со страниц журнала Американского акустического общества (статьи Джангера, Хиклинга, Дулитла и других). Авторы статей утверждают, что можно классифицировать объект по характеру отражения звука от него.

Л. М. Лямшевым еще в 50-х годах было обнаружено и проанализировано явление усиления гидролокационного отражения от пластин в жидкости вследствие возникновения в них продольных волн при падении гидролокационного импульса. Работа Л. М. Лямшева докладывалась в Венгерской академии наук и получила общее признание. Весьма интересные исследования по теории эхолокации выполнены в различное время А. А. Клещевым, Ю. А. Кравцовым, У. Нигулом, Е. Л. Шендеровым и другими.

Говоря о создании в нашей стране акустических приборов для подводного обнаружения, нельзя не упомянуть о деятельности профессора Военно-морской академии В. Н. Тюлина. Работая, по существу,

в одиночку, он еще в 30-е годы сконструировал весьма совершенный по тому времени эхолот и внес вклад в теорию действия шумопеленгаторов. Свою лепту внесли также Л. Я. Гутин, А. М. Тюрин, С. Я. Соколов — создатель и руководитель первой в стране кафедры электроакустики.

Приближались грозные годы Великой Отечественной войны, и освоение гидроакустической техники нашим подводным флотом было как нельзя более своевременным. Чтобы читатель мог в полной мере ощутить ее роль, приведем два последовавших один за другим эпизода, связанных с подводной лодкой, которой суждено было стать легендарной.

В начале 1945 года в результате прорыва Советских Вооруженных Сил в Восточной Пруссии была окружена громадная курляндская группировка гитлеровских войск. Из отрезанного Данцига (Гданьск), где находилась немецкая школа подводного плавания, вышел в Киль под усиленным конвоем самый большой немецкий лайнер «Вильгельм Густлов» водоизмещением более 25 тысяч тонн. На нем находилось несколько десятков экипажей высококвалифицированных подводников, которых уже ждали в Киле, чтобы укомплектовать ими новые подводные лодки. Всего же на корабль набилось более семи тысяч фашистов.

В этом районе патрулировала подводная лодка «С-13» * под командованием капитана 3-го ранга А. И. Маринеско. В январе на Балтике темнеет рано, к тому же шел снег; рассчитывать можно было только на гидроакустику. Около 8 часов вечера гидроакустик И. М. Шнапцев доложил о далеком шуме винтов и указал пеленг на группу кораблей. Маринеско применил дерзкий маневр: он зашел со стороны берега и выпустил три торпеды по главной цели, теперь уже отчетливо выделяющейся среди кораблей охранения.

Лайнер быстро пошел ко дну. Лодке удалось уйти от бомбежки и преследования. Узнав о потоплении морского гиганта, Гитлер приказал расстрелять командира конвоя, а в Берлине во второй раз за время войны был объявлен трехдневный траур (первый раз это было во время разгрома фашистских

* Впервые подвиг «С-13» был описан автором в книге «Подводный звук» (1963 г.), однако в ней ошибочно, со слов А. И. Маринеско, была указана фамилия одного из акустиков лодки.

войск под Сталинградом). В эфир пошло сообщение, что командир «С-13» объявлен врагом рейха и личным врагом Гитлера.

Однако лишь усмешку вызвали эти угрозы у экипажа лодки. На борту еще имелись торпеды, и можно было продолжать поиск противника. Прошло десять дней, и снова ночью, и снова гидроакустики обнаружили шумы большого корабля с охранением и вывели лодку на дистанцию видимости. Новый торпедный залп — и перестал существовать крупный транспорт «Генерал Штойбен». Из находившихся на борту 3600 солдат и офицеров спаслось менее трехсот. Найти в крошечной мгле и отправить на дно моря два громадных корабля с целой дивизией гитлеровцев за одну декаду — в этом военном триумфе подводной лодки роль гидроакустиков была не последней.

После второй мировой войны гидроакустика начала быстро развиваться во всех странах. Точность пеленга на шумящие или отражающие звук подводные объекты достигла долей градуса, дальность действия локации увеличилась во много раз. Была освоена локация в зонах вторичного выхода звуковых лучей к поверхности моря, а также в зонах тени для прямого сигнала. Американская донная гидроакустическая система «Цезарь», работающая на низких частотах локации в море, где затухание звука особенно мало, по сообщениям печати, обнаруживает присутствие подводных лодок на расстоянии до 400 километров. Появилась разновидность гидролокационной системы, в которой обнаружение подводных объектов производится с помощью разнесенных под зеркальным углом излучателя и приемника гидролокационных сигналов. Здесь требуется особая точность во взаимодействии носителей излучателя и приемника, но такая система себя оправдывает, так как сила отражения под зеркальным углом наблюдения наибольшая и легче обнаружить объект, снабженный защитными средствами.

Развертываются глобальные гидроакустические системы. Одна из них под зловещим названием «Морской паук» должна обеспечить сбор гидроакустической информации чуть ли не со всей акватории Тихого океана и передачу ее через гидроакустические буи искусственным спутникам, быстро доносящим

сведения о подводной обстановке в координационные центры, возглавляемые соответствующими отделами Пентагона. Конечно, во всех этих сообщениях много элементов рекламы. Однако, если исключить их, приходится все же признать, что достижения современной военной гидроакустической техники весьма впечатляющи.

Впору вспомнить об эпитафии главы. Бедный Леонардо! Он, который считал прослушивание судов через опущенную в воду трубку невинным и любопытным физическим экспериментом, он, который ненавидел войну и все, что с ней связано, называл «злым бедствием», что бы он сказал, узнав, что через четыре века по океанам будут разбросаны многокилометровые дьявольски чуткие электронные уши.

Пожалуй, еще более властно заявляет о себе мирная гидроакустика. Применение ее до невероятности многообразно и все более связывается с интенсивным освоением Мирового океана.

Эхолот в традиционном исполнении и с традиционными функциями меньше других морских акустических приборов нуждается в представлении. Едва ли найдется морское судно, не имеющее его. На гидрографических судах появились эхолоты-картографы с автоматической цифровой отметкой глубин на карте.

Обычный эхолот для контроля глубин под килем судна породил семейство себе подобных и все же различных как по назначению, так и по степени совершенства гидроакустических устройств. Это и приборы с весьма большой мощностью излучения, позволяющие получить отметку не только линии дна, но и отражающих звук грунтовых пород на достаточно большой глубине под поверхностью дна. Это и сканирующие эхолокационные устройства бокового обзора, их не назовешь иначе, как автоматическими топографами дна водоемов. Мелкие выступы дна высотой с полметра, траншеи, кабели на дне — все фиксируется ими на специальной бумаге.

Рыболокаторы тоже достаточно широко известны. Международные выставки «Инрыбпром», регулярно проводимые в Ленинграде через каждые несколько лет, являются смотром новинок рыбной промышленности, в том числе и поисковой аппаратуры. Современный рыбопоисковый гидролокационный комплекс

следит за косяком рыбы от момента первичного его обнаружения до момента попадания в трал. Если рыбное скопление изменило, скажем, глубину своего движения, соответствующее устройство меняет и глубину опускания трала, его раскрытие. Интегрирующие приборы позволяют определить суммарный объем встречного рыбного скопления и прогнозировать, таким образом, целесообразность его отлова.

Из многообразных областей применения гидроакустических средств при освоении богатств Мирового океана отметим лишь одну, связанную с бурно развивающейся добычей нефти со дна. Совсем недавно бурение дна в нефтеносных районах велось лишь в пределах океанского шельфа, то есть на глубинах в несколько сот метров. Первенцем подводного бурения дна в открытом море было судно «Гломар Челленджер»; сейчас таких судов насчитываются в мире сотни.

По крайней мере, две проблемы при подводном бурении решаются с помощью гидроакустики. Первая — удержание дрейфующего судна над скважиной. Гидроакустические излучатели-маркеры, расположенные на дне около скважины, непрерывно посылают вверх звуковые импульсы. По этим сигналам на судне определяют, в какую сторону его сносит относительно скважины, и соответственно приводят в действие те или иные подруливающие устройства.

Вторая задача посложнее. Допустим, необходимо сменить затупившийся бур. Бурильную колонку с новым буром опускают ко дну. Но подводные течения относят эту гибкую и длинную колонку в сторону, как относит ветер паутинную нить с висящим на ней пауком. Приводится в действие гидролокационное устройство, находящееся на конце колонки. С удалением от донной скважины излучаемые устройством импульсы имеют относительно большую продолжительность. Это режим поиска. Нащупав по отраженному сигналу скважину, конец колонки начинает приближаться к ней. Наступает режим точного наведения. Импульсы учащаются, становятся короче. В момент подхода к скважине срабатывает соответствующее устройство, и колонка погружается в скважину.

Освоение океана немыслимо без глубоководных аппаратов, которых уже насчитывается великое множество. Связываются они между собой и с обеспечивающими надводными судами с помощью гидроакусти-

ческого телефона, определяют рельеф дна и его глубинную структуру с помощью гидролокационных «щупалец».

Ученых при освоении Мирового океана больше всего беспокоит сохранение его биосферы. Великий акванавт нашего времени Жак-Ив Кусто обратил к человечеству такие слова:

— Море сохранит свои богатства только в том случае, если будут соблюдены биологические законы... Пора положить предел романтической эпохе «тайн моря». Тайн моря нет, остались настоящие проблемы, которые следует разрешить. Мы на пороге новой эры поисков и исследований.

Гидроакустические методы и приборы займут в этих поисках достойное место.

ЗВУКИ В КОСМОСЕ

Мы услышим полет всех планет...

А. Блок

— **А**кустика в космосе? Это что-то новое, скажет, возможно, иной... акустик, иронически улыбаясь,— ведь в космосе нет достаточно плотной газовой среды, в которой могут распространяться упругие колебания.

Однако начнем с сигналов из ближнего космоса. Загадочные звуки полярных свечений... Связаны они с перемещениями областей ионизированного газа, но точный механизм их возникновения до сих пор не раскрыт. Иногда они похожи на ударные звуковые волны от сверхзвуковых самолетов. Наблюдались многократные отражения этих звуков от поверхности Земли и от неоднородностей верхних слоев атмосферы.

Искусственные спутники и ракеты. Это уже настоящий космос. При прохождении ракеты «Аполлон» над

Бермудскими островами на высоте 188 километров, где, казалось бы, плотность атмосферы ничтожна (в 10^9 раз меньше, чем у поверхности Земли), неоднократно регистрировались на островах низкочастотные сигналы, также похожие на звуковые удары самолетов.

А что внутри ракет, космических кораблей? Космонавт А. Николаев при полете на одном из «Союзов» так описал свои «акустические» впечатления:

При спуске вначале был слышен небольшой шум, свист высокого тона. Этот тон постепенно нарастал и превратился в гул работающего реактивного двигателя, затем он перешел как бы на форсажный режим работы двигателя самолета с сильным рокотом...

Как видно, в космических устройствах могут встречаться вполне «земные» ощущения. Эта близость к земным ощущениям еще усилится при длительных полетах. Будет надоедать космонавтам постоянный шум двигателей, работа которых необходима для жизнеобеспечения обитателей кораблей и выполнения научных и иных операций. Потребуется разнообразие средств борьбы с шумами и вибрациями. Те же вибрация и шум, которые сейчас используются для диагностики и дефектации механизмов, определения степени их работоспособности и надежности, будут сигнализировать о случайных неисправностях в орбитальных лабораториях, например при стыковке космических кораблей. Целая система амортизаторов гасит возможные удары и вибрации в момент стыковки двух несущихся с бешеной скоростью космических аппаратов, гасит в любом направлении, по всем степеням свободы, которыми обладают тела в космическом пространстве.

На космических снарядах в условиях невесомости, будут, как известно, получать диковинные сплавы и материалы. Возможно, на помощь придет и ультразвук, смешивающий, раздробляющий малые частицы жидких материалов. Одним словом, земная акустика будет все больше заявлять о себе космоплавателям.

А что делается снаружи космического корабля, непосредственно вблизи от его борта? Уже сейчас здесь действует акустика, работает структурный звук. Выставленная за борт металлическая мембрана воспринимает удары несущихся навстречу микрометеоритов, кусочков космического вещества. Каждый удар частицы о мембрану возбуждает ее колебания, данные

о которых с помощью индукционного или иного датчика поступают внутрь корабля на счетную электронную схему либо передаются радиоустройством на Землю. Этим способом канадские ученые оценили значения микрометеоритной активности в функции от высоты ракеты над Землей.

Луна, планеты Солнечной системы и их естественные спутники. Здесь — раздолье для акустиков-геофизиков, а на тех планетах, где есть атмосфера, и для атмосферных акустиков. Установленное на Луне американскими астронавтами устройство позволило сделать интересное открытие: время реверберации (послезвучания) колебаний в породах лунного грунта приближается к минуте. Луна звучит, как церковный колокол! Пока еще не дано объяснение этому явлению.

Была измерена скорость распространения звука в лунных породах. Когда-то великий насмешник, мастер парадоксов и иронических сентенций Эразм Роттердамский писал, что «...Луна состоит из заплесневелого сыра...» Два европейских геофизика не пожалели времени на то, чтобы измерить скорость продольных волн в... сырах из Италии, Швейцарии, США, Норвегии. Возможно, как о курье, они сообщали, что скорость звуковых волн в этих сырах (от 1,6 до 2,1 километра в секунду) соответствует нижнему пределу скорости распространения звука в лунных породах.

Несомненно, уже в ближайшее время будут досконально изучены акустические свойства пород на поверхности Венеры и Марса. А в атмосфере Венеры с ее чудовищной плотностью возможно существование звуков огромной интенсивности.

Плазма — одно из состояний упругого вещества. Уже производились опыты по возбуждению механических звуковых колебаний в плазменных шнурах установок, в которых имеются условия для возникновения термоядерной реакции. Поэтому когда при исследовании пятен на Солнце были обнаружены колебания низкой частоты с длиной волны порядка 2500 километров и на основании некоторых данных было высказано предположение, что эти волны имеют инфразвуковое, а не магнитное происхождение, то эта версия не встретила у ученых особых возражений.

Как видим, в акустических проблемах в космосе уже сегодня нет недостатка. Первую страницу космической акустики можно считать открытой. Но пытливый ум

исследователей углубляется в совсем уже не изведанные просторы мироздания. Один японский журнал в 1973—1974 годах опубликовал цикл статей о генерации звука ни много ни мало, как в первичной турбулентности... расширяющейся Вселенной; едва ли кто-нибудь задумывался раньше о возможности сочетания акустики и космогонии.

ЗВУКОВАЯ ЭНЕРГИЯ УШЛА, А ГРОМКОСТЬ ЗВУКА ВОЗРОСЛА!!

По-видимому, отзвук (эхо) существует всегда, но не всегда отчетливо выражен.

Аристотель. О душе

Говоря об удивительном в мире звука, нельзя обойти вниманием своеобразные, кажущиеся на первый взгляд парадоксальными явления на границах сред с сильно разнящимися акустическими сопротивлениями.

Хотя мы не желали бы докучать читателю формулами, но без нескольких простейших определений основных акустических величин все же не обойтись. Когда волна продольная, то есть направление колебаний частиц среды совпадает с направлением распространения волны, то переменное (звуковое) давление в ней p связано с колебательной скоростью частиц v выражением $p = Zv$, где коэффициент пропорциональности Z представляет собой акустическое сопротивление среды, равное произведению плотности среды на скорость распространения звука в ней (не путать со значительно меньшей по величине v !). Электроакустики склонны именовать приведенное выражение «акустическим законом Ома», хотя оно появилось раньше работ Ома. «Удобнее запоминать», — утверждают они. Может быть, это и справедливо для современного общества, в которое электротехника внедрилась весьма широко.

Вторая формула относится к определению интенсивности или, что то же, силы звука, представляющей

собой поток звуковой энергии через единицу площади фронта волны в единицу времени: $J = \frac{1}{2} \cdot \rho^2 / Z = \frac{1}{2} v^2 Z$. Вооруженные этими двумя начальными буквами акустической азбуки, приступим к интересующему нас вопросу о явлениях на границах разнородных сред.

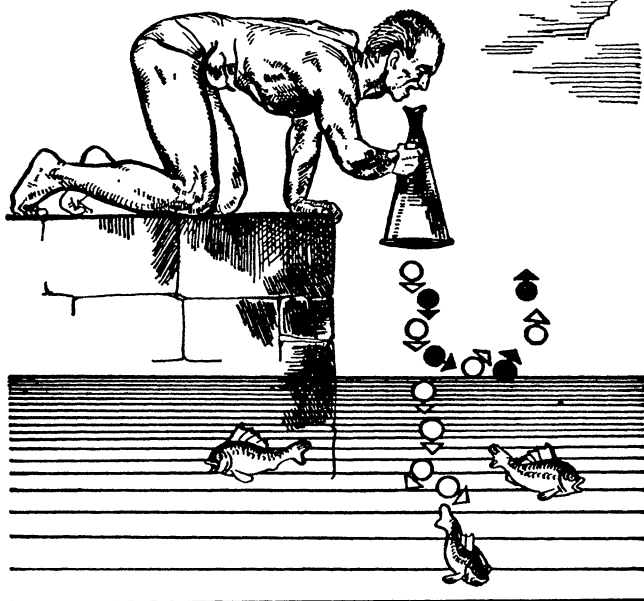
Пусть звук произвольной частоты падает по нормали из среды с малым акустическим сопротивлением (например, воздушной) на границу среды с большим акустическим сопротивлением (вода, кирпичная кладка и т. п.). Одним из интересных, хотя, быть может, еще не поражающих нас феноменов является то, что в эту вторую среду передается переменное (звуковое) давление, почти вдвое превышающее звуковое давление в первой среде.

Несложный физико-математический вывод подтвердил бы это. Но, быть может, читателя убедит совсем уже простая демонстрация (имеющая, согласимся, скорее мнемонический, чем физический характер). Демонстратор, которым может быть всякий лектор, обходится самыми что ни на есть элементарными средствами (их можно было бы назвать подручными, если бы вместо рук здесь не фигурировали ноги). Человек, на время перевозоплотившийся в звуковую волну (почему бы не вообразить такое?), быстро приближается в комнате к капитальной стене. У нее он мгновенно поворачивается кругом, изображая теперь уже отраженную волну. Но чтобы не удариться о стенку какой-либо чувствительной частью тела, он упирается в нее подошвой ноги. Ясно, что материал стены испытывает при этом довольно значительный импульс давления, которое распространяется с определенной скоростью от места возмущения.

Акустическое сопротивление воды приблизительно в 3600 раз больше акустического сопротивления воздуха. И здесь следует ожидать увеличения звукового давления по сравнению с давлением в воздушной среде. М. А. Исакович в своем курсе акустики указывает на температурные и иные явления, препятствующие удвоению давления во второй среде. То или иное увеличение звукового давления все же наблюдается экспериментально.

Но раз возросло давление, то увеличилась и громкость звука, ибо слуховые аппараты большинства живых существ реагируют именно на величину звукового

 — ЗВУКОВАЯ ЭНЕРГИЯ
 — ЗВУКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ



На границе среды с большим акустическим сопротивлением звуковое давление почти удваивается (хотя в нее переходит лишь ничтожная часть звуковой энергии). Кричать над поверхностью воды — верный способ распугать рыб, слуховой аппарат которых, как и у большинства живых существ, реагирует на величину звукового давления.

давления, а не звуковой энергии, например. Таким образом, дан ответ на одну из частей заголовка главы, хотя можно признать, пожалуй, что ничего особенно удивительного мы пока еще не узнали.

Это удивительное усматривается из сопоставления полученного результата с величиной звуковой энергии, прошедшей во вторую среду. Вторая из приведенных выше формул сразу дает нужный ответ. Пусть звуковое давление увеличится даже в 2 раза, тогда числитель в выражении интенсивности звука возрастет в 4 раза. Но ввиду того что знаменатель одновременно уменьшится в тысячи раз, звуковая энергия во второй среде будет ничтожной. Так, в воду из воздуха прохо-

дит лишь малая доля процента энергии падающей волны, а, например, в скалу, в бетонный массив — и того меньше. Звуковая энергия, таким образом, почти полностью отражается от границы раздела среды с большим акустическим сопротивлением.

Может возникнуть вопрос, почему ныряльщиков не оглушают крики с берега? Их спасают от звуковой перегрузки изолирующие звук воздушные пробки, всегда остающиеся в слуховом проходе погруженного в воду человека. Да и рыбы, не имеющие подобных звукоизоляторов, воспринимают отчетливо лишь звуки в пределах достаточно узкого конуса. При угле падения более 13° происходит полное отражение звука от поверхности воды.

У любознательного читателя мог бы возникнуть еще вопрос: а что будет наблюдаться при обратном переходе звука — из среды с весьма большим акустическим сопротивлением в среду с малым акустическим сопротивлением? Можно показать, что и в этом случае перейдет лишь ничтожная часть звуковой энергии, но здесь уже колебательная скорость во второй среде будет близка к удвоенному значению, а звуковое давление в ней близко к нулю. Поэтому до нас не доносится в воздухе звук от удара одного камня о другой (хотя ныряльщик, проделавший это, сам слышит довольно интенсивный шум, несмотря даже на изолирующие воздушные пробки в ушах).

Вот какие метаморфозы звуковой волны возможны на границах разнородных сред.

КОГДА РЕЗОНАТОР УСИЛИВАЕТ И КОГДА ОСЛАБЛЯЕТ ЗВУК

Резонанс — резкое возрастание амплитуд... колебаний, наступающее при приближении частоты... внешнего воздействия к частоте одного из нормальных колебаний, соответствующих данной колебательной системе.

Физический словарь

Некто смотрел из укрытия, как два льва вцепились в тело друг друга. На момент он отвернулся и когда вновь взглянул на место боя, то увидел, что противники исчезли; они съели друг друга. На земле виднелись лишь оставшиеся от них хвосты...

Из современной сказки

Кому не известно, что такое резонанс? «Резонанс — это когда сильно мотает», — сказал один студент, не подозревая, впрочем, что излагает житейским языком определение физического словаря. Интеллигент с большим читательским стажем уже приведет пример вредных последствий резонанса:

— Знаете, почему разрушился Египетский мост в Петербурге? Потому, что воинская часть, проходившая по нему, не сменила команды «в ногу». Произошла усиленная вибрация, и вот...

Мы, в свою очередь, приведем еще один, менее известный пример последствий резонанса. 2 марта 1907 года утром в день предстоявшего заседания Государственной думы обвалился потолок в главном зале Таврического дворца. Причина — работа небольшого электровентилятора на чердаке, включенного для проветривания зала перед заседанием Думы.

Александр Грин, которого знают как автора романтических и приключенческих повествований, был не чужд жанру сатиры. Через несколько дней после описанного события в одной из столичных газет появилась его «Элегия», написанная в манере стихотворения Лермонтова «Когда волнуется желтеющая нива». Сатира Грина начиналась так:

Когда волнуется краснеющая Дума
И потолок трещит при звуке ветерка...

Концовка тоже созвучна лермонтовским строкам:

...Тогда смиряется души моей тревога;
И затаив мечты о воле и земле,
И истребив морщины на челе,
Сквозь потолок я вижу бога!...

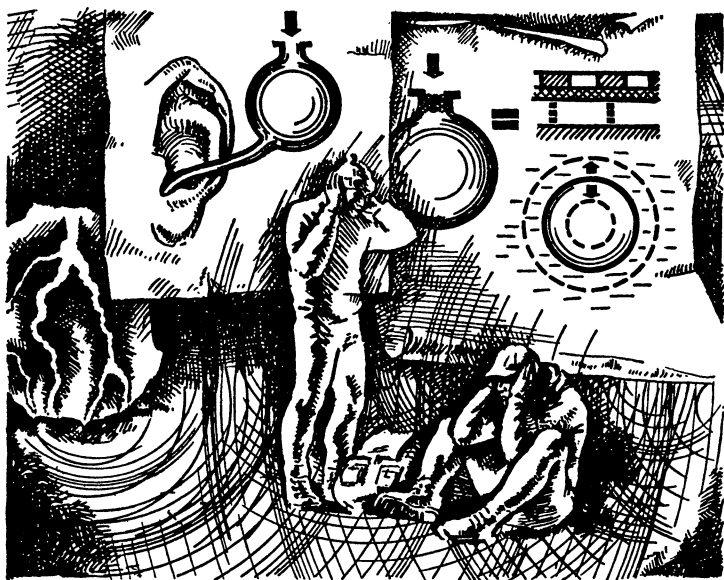
Это едва ли не единственная стихотворная ода резонансу, хотя и порожденная главным образом политическими причинами.

Но почему же все-таки мост не обрушивается и потолок не трещит в отсутствие резонанса? В простейшей упругоинерционной системе выше или ниже частоты резонанса сопротивления колебательному движению упругого или соответственно инерционного элемента достаточно велики (и взаимно обратны по фазе колебаний). Лишь на частоте резонанса эти взаимно противодействующие сопротивления, быть может, несколько таинственным для непосвященного образом «съедают друг друга» (совсем как сказочные львы в эпитафии), и остается лишь «хвостик» — сопротивление трения, которое почти всегда меньше сопротивления упругости и массы. Амплитуда колебаний системы увеличивается во много раз, что и может привести к печальным последствиям.

Полвека назад, в 1936 году, академик А. Н. Крылов выпустил книгу «Вибрация судов», появление которой, по словам его ученика, другого выдающегося ученого П. Ф. Папковича было настоящим событием. А. Н. Крылов сделал вывод о важности изучения явлений вибрации. В частности, о явлении резонанса он писал так:

...явления резонанса проявляются во всей природе, начиная от великого неравенства в движении Сатурна и Юпитера и кончая настройкой радио или дрожанием электрической лампочки оттого, что в соседней комнате работает швейная машина. А раз это явление столь всеобщее, то всякий техник и инженер должен его знать, уметь его предвычислять, чтобы, где надо, его использовать, а где надо — избежать.

Перейдем к устройству, в котором осуществляется резонанс акустических элементов. Это простейший резонатор Гельмгольца — сосуд, подобный колбе. Воздушная пробка в горле сосуда является акустическим элементом массы, внутренняя полость резонатора — элементом упругости. При резонансе увеличиваются колебания воздушной пробки, в такт этому возрастает колебательное давление во внутренней полости резо-



Когда резонатор усиливает звук (рисунки слева) и когда поглощает (рисунок справа).

натора по сравнению с давлением в свободном поле. Звуковую энергию для усиленных колебаний резонатор отбирает из окружающего его звукового поля.

Если к полости резонатора подвести трубку, другой конец которой приложить к уху, то можно убедиться в усиливающем действии резонатора. Такое устройство применялось для помощи людям с ослабленным слухом. Наборы резонаторов использовались в первых анализаторах звуковых спектров. Каждый из резонаторов был настроен на свою частоту и выделял в сложном звуковом спектре соответствующую спектральную составляющую.

Пещера с узким наружным входом тоже служит резонатором. Он усиливает звуки особенно низких частот; туристы и спелеологи знают, как сильно отдаются удары грома в подобных пещерах.

Впрочем, для создания резонанса совсем не обязательно иметь узкий и длинный вход. Резонатором может служить любая достаточно глубокая ниша, пусть даже одинакового поперечного сечения. 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.

Любая бутылка, не заполненная жидкостью, — тоже резонатор; убедиться в этом нетрудно. Один современный английский акустик, в частности, рассмотрел ее резонансные свойства в монографии «Акустика винной бутылки». Несмотря на игривое название, это — серьезная научная работа, возможно, не столь значительная, как творение великого Кеплера «Стереометрия винных бочек», но уже не уступающая исследованию почти нашего современника Ч. Бойса «Мыльные пузыри», которое считается классическим.

Итак, резонатор усиливает звук, это совершенно ясно, не правда ли? Однако, как бы это странно ни звучало для некоторых, резонатор прежде всего... поглощает, то есть ослабляет, звук. Противоречие здесь кажущееся. Все дело в том, о каком параметре колебательного процесса вести речь. Да, в полости резонатора усиливается в той или иной степени звуковое давление. Но при этом в нем всегда поглощается определенная звуковая энергия. В какой-то мере в этом смысле резонатор можно сравнить с электрическим трансформатором. Во вторичной обмотке повышающего трансформатора увеличивается электрическое напряжение по сравнению с напряжением в первичной обмотке. Но в то же время трансформатор, к сожалению, поглощает часть электрической энергии вследствие нагрева обмоток, вихревых токов в сердечнике и т. п.

Электрики стараются, насколько возможно, уменьшить эти потери. То же делали и акустики, создавая резонаторы с очень высокой добротностью для выделения отдельных составляющих в спектре анализируемого звука. Но вот кому-то пришла в голову идея увечилить поглощение в акустическом резонаторе с целью ослабления звука вблизи резонатора. Так родилось новое направление в теории и технике звукопоглощения — резонансное звукопоглощение.

Ряд ученых из разных стран отдал ему дань: в СССР — С. Н. Ржевкин, М. С. Анцыферов, В. С. Нестеров и другие, в США — У. Мак Нэйр, в Англии — Е. Пэрис, в Дании — Ф. Ингерслев. Резонансное звукопоглощение осуществляется в более или менее узкой области относительно низких частот. Можно расширить

ее, применив набор резонаторов, настроенных на различную частоту. Но если потребуется ослаблять звук на более высоких частотах, придется применить поглотители другого рода, о которых еще будет сказано ниже.

Как же практически осуществлять устройство резонансного поглощения для ослабления звука в помещениях? Неужели вмазывать в стены колбо- или бутылкообразные сосуды? Нет, современная строительная практика нашла более удобные конструкции. На некотором расстоянии от стены или потолка помещения устанавливается более или менее толстый перфорированный лист. Отверстия в листе играют роль горлышек резонаторов Гельмгольца, а пространство между листом и стенкой — роль полостей.

Теперь возникает следующий вопрос: где разместить дополнительный звукопоглощающий элемент, увеличивающий потери в резонаторе? В районе горлышка резонатора колебательная скорость частиц среды наибольшая, и, следовательно, наибольшими будут потери на трение. Здесь и помещают слой волокнистого материала или толстой ткани, который с успехом выполняет функцию поглотителя звука.

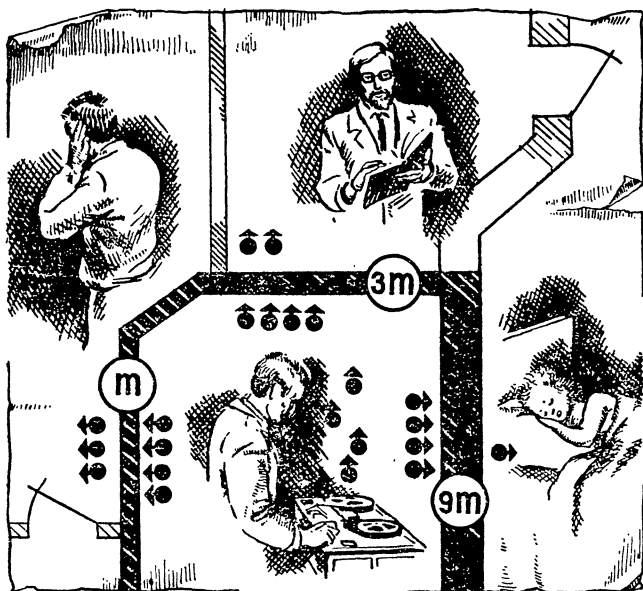
Таковыми или подобными системами резонансного поглощения можно оборудовать стены или потолки помещений с целью уменьшения шума в них. Вместо перфорированных панелей иногда устанавливают наборы вертикальных реек с зазором относительно друг друга. Получается так называемый щелевой резонансный поглотитель, которому можно придать очень красивый вид, соответствующий современным архитектурным тенденциям.

Известно, что для хорошего восприятия музыки и речи зал должен иметь ту или иную степень гулкости; акустики в этом случае говорят о «времени реверберации помещения». Время реверберации можно уменьшать, устанавливая дополнительные звукопоглотители, в том числе резонансные.

Сам зал, собственно, это тоже резонатор. Но, в отличие от резонирующих сосудов, у него много собственных частот. Чаще требуется, как только что сказано, заглушить колебания на этих частотах, но иногда зал сам по себе оказывается заглушенным в той или иной области частот; для более полного звучания музыки, пения, речи требуется выделить эти области частот. Встает вопрос о «поддерживаемом» резонансе

зала. Такой поддерживаемый с помощью электроакустической аппаратуры резонанс осуществлен, например, в зале Ройял Фестиваль Холл в Лондоне.

Колбообразные сосуды, различные ниши и впадины, наконец, целые помещения,— все это как-то сообразуется с представлением о резонансных системах. Но есть резонаторы и там, где трудно это предположить. Что бы вы сказали о пузырьке воздуха или газа в жидкости, например в стакане с нарзаном? Немецкий акустик Э. Мейер, первый лауреат золотой медали имени Рэлея, открыл это еще в 30—40-е годы. Упругим элементом в резонирующем пузырьке служит объем газа, а инерционным — масса воды, участвующая в колебаниях внешней поверхности пузырька. Принимая в 1971 году от Английского акустического общества медаль имени Рэлея, Мейер в ответной речи сообщил, что звукопоглощающие пузырьки в жидкости, делающие «глухим» звеневший до этого хрустальный бокал с шипучим шампанским, подсказали ему идею подводного звукопоглотителя из слоя пластмассы с внутренними воздушными полостями. Он не преминул отметить, что подобный гидроакустический звукопоглотитель, названный им «Альберихом», использовался на гитлеровских подводных лодках для защиты от обнаружения их гидролокаторами союзников.



«Закон массы» в действии: каждое увеличение массы стенки в три раза уменьшает громкость проходящего через стенку шума приблизительно в два раза.

шума в дело неизбежно вмешивается логарифмический закон. А этот закон в вопросах звукоизоляции ведет к довольно серьезным последствиям с точки зрения массы конструкций.

Пусть имеется весьма легкая звукоизолирующая стена (скажем, масса ее на единицу площади не превышает одного килограмма на квадратный метр), и мы, с целью увеличения звукоизоляции, заменим ее вдесятеро более тяжелой стеной, то есть с массой 10 килограммов на квадратный метр. Громкость шума какого-либо акустического источника, находящегося за стенкой, уменьшится в определенное число раз (не приводя объяснений, которые нас завели бы далеко, укажем, что эта громкость уменьшится не более чем в 3—4 раза). Но оказалось, что это уменьшение громкости недостаточно и надо ее уменьшить, скажем, еще во столько же раз. Потребуется, следуя логарифмическому закону, увеличить массу стены опять в 10 раз, то есть с 10 до 100 килограммов

на квадратный метр. Неумолимый акустический «закон массы» оборачивается для строителей и эксплуатационников довольно неприятными последствиями.

Слабым утешением является то, что теперь мы уже можем ответить на вопрос, поставленный в заголовке. Лист железа все же тяжелее ватного одеяла той же площади, и этот лист с точки зрения звукоизоляции следует предпочесть одеялу. Правда, дело не только в массе, но и в том, что для обеспечения звукоизоляции материал должен быть не рыхлым, а плотным, без пор и пустот, проводящих звук, как это имеет место в том же слое ваты.

Впрочем, следует ли полностью отвергать одеяло? Звукоизолирующий материал отбрасывает звуковую энергию обратно, и если ее не поглотить, то неизбежно увеличение звукового уровня в помещении источника, а следовательно, и в самом изолируемом помещении. Оптимальным является сочетание звукоизолирующей конструкции со звукопоглощающей. Так, собственно, и осуществляют звукоизолирующие кожухи и капоты для шумящих механизмов: стальные стенки с нанесенными изнутри на них слоями рыхлых волокнистых или пористых материалов.

Итак, можно сказать: «звукоизоляция любит массу». Но...

Едва лишь строительные и архитектурные акустики начали понемногу привыкать к неумолимому «закону массы», как на сцене появился незнакомец, который более чем что-либо другое (кроме сквозных отверстий) ухудшает звукоизоляцию стенок в области максимальной чувствительности слуха. Разумеется, это не живое существо, а процесс. Но прежде — два слова истории.

Еще в 1941 году С. Н. Ржевкин с одним из своих сотрудников наблюдал аномальное прохождение звука через пластинки. При некоторых частотах колебаний и углах падения звуковой волны на пластинку наблюдалось интенсивное прохождение через нее звука. Удовлетворительного объяснения этому явлению подыскать тогда не удалось.

Несколько позже Л. Кремер, производя теоретический анализ взаимодействия звукоизолирующих стенок со звуковым полем, открыл так называемый резонанс совпадения. Суть его заключается в том, что при равенстве фазовой скорости звуковой волны

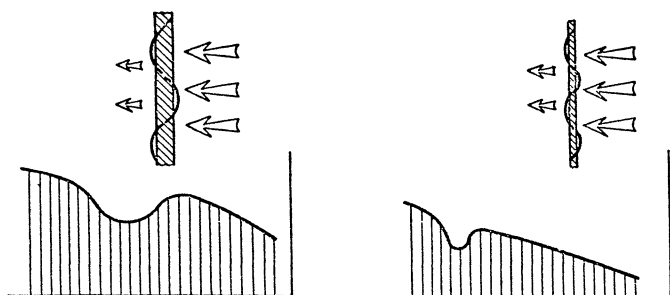
вдоль поверхности пластины (а эта скорость является в данном случае не чем иным, как проекцией на плоскость пластины вектора скорости в падающей волне) и скорости изгибных волн в пластине падающая волна должна полностью пройти через пластину. Иными словами, при данной частоте и данном угле падения звука звукоизоляция пластины будет равна нулю (если в ней нет потерь энергии).

Мы уже касались ранее резонансных явлений, преимущественно в акустических системах, малых по сравнению с длиной звуковой волны. Неизбежно пойдет речь о резонансах и при последующем рассмотрении виброизоляции в механических системах. Резонанс совпадения — своеобразнейший из резонансов. Прежде всего, это пространственный резонанс; при его возникновении пластина (стенка) взаимодействует со звуковым полем не в точке или локальной области, а по определенной, обычно достаточно большой площади.

А как ведут себя частоты «обычных» резонансов в зависимости от основных параметров колебательных резонирующих систем? Практически каждому человеку хоть раз довелось наблюдать, что чем большая масса подвешивается к крючку безмена, тем ниже частота колебаний этой массы на пружине безмена. Частота акустического резонатора, собственные частоты пластинок или стержней также тем ниже, чем больше массы и чем меньше жесткости соответствующих элементов. Частота же резонанса совпадения, наоборот, возрастает с увеличением массы и уменьшением жесткости пластин, на которые падает звук.

Наконец, обычные резонансы проявляются, как правило, в достаточно узкой полосе частот. Частота резонанса совпадения зависит от угла падения звука. А так как в диффузном, размешанном звуковом поле все углы падения звука на пластину равновероятны, то при этом виде поля, характерном для большинства помещений, полоса частот резонанса совпадения каждой перегородки или стенки (а следовательно, и полоса частот, в которой перегородка или стенка пропускает звук) достаточно широка.

«Дефективный» резонанс совпадения обусловил довольно противоречивую картину зависимости звукоизоляции от толщины стенки. С одной стороны, увеличение толщины стенки согласно «закону массы»



При увеличении толщины стенки звукоизоляция на низких и средних частотах увеличивается, но «коварный» резонанс совпадения, вызывающий ухудшение звукоизоляции, начинает проявляться на более низких частотах и захватывает более широкую их область.

увеличивает звукоизоляцию. Но с другой стороны, ухудшающий звукоизоляцию резонанс совпадения проявляется на более низких частотах и захватывает более широкую полосу частот. У свинцовых же звукоизолирующих перегородок, благодаря их большой массе и весьма малой жесткости, резонанс совпадения находится в неслышимой ультразвуковой области частот.

Кирпичные стены. Это — масса, а значит, и звукоизоляция. И резонанс совпадения по некоторым причинам здесь проявляется слабее. Но кирпичные стены не поставишь на теплоход или самолет. Нужно «обмануть» закон массы; нужны облегченные, но хорошо изолирующие звук устройства. В какой-то мере это удастся достичь применением двухстенных конструкций. Воздушный промежуток между стенками с точки зрения увеличения эффекта звукоизоляции — примерно то же, что воздушный слой между стеклами оконной рамы для увеличения теплоизоляции.

Ширина воздушного слоя между стенками, влияет ли она на величину звукоизоляции? Одно время, ссылаясь на возникающие в воздушном слое резонансы объема воздуха, утверждали, что существует оптимальная ширина воздушного зазора в двухстенной конструкции, иначе резонансы будут возникать в более низких частотах и захватят более широкую их область. Опыт показал, что при наличии в зазоре звукопоглощающих материалов бояться этих резонансов не следует.

Таким образом, чем больше зазор между стенками, тем выше звукоизоляция двухстенной конструкции. Л. Кремер в возглавляемом им Институте технической акустики демонстрировал советским специалистам двухстенную конструкцию из стеклоблоков с зазором между стенками, достигающим почти метра. Конструкция предназначалась для световых проемов в баптистской церкви, находящейся на одном из самых шумных перекрестков Западного Берлина. Как выяснилось, прихожане этой церкви не могли с должной сосредоточенностью совершать обряды даже при малейшем шуме. Последовало обращение, во имя бога, к строительным акустикам, подкрепленное, впрочем, земными, финансовыми стимулами. Разработанная световая конструкция обеспечила звукоизоляцию до 80 децибел, что не уступает звукоизоляции кирпичной стены, имеющей значительно большую массу.

Влияние «закона массы» на звукоизоляцию по-разному проявляется в конструкциях различной площади. Значительную роль играют характер заделки звукоизолирующей стенки по контуру и вид элементов, связывающих между собой стенки в двухстенной конструкции. Эти и другие вопросы применительно к изоляции воздушного и ударного шума (последний имеет место в конструкции полов) исследовались ведущими советскими строительными акустиками С. П. Алексеевым, И. И. Боголеповым, В. И. Заборовым, С. Д. Ковригиным, М. С. Седовым, В. М. Спиридоновым и другими, во многом содействовавшими внедрению эффективных звукоизолирующих конструкций в строительстве, на производстве и на транспорте.

ОТВЕРСТИЯ И ЩЕЛИ — ВОРОНКИ ДЛЯ ЗВУКА

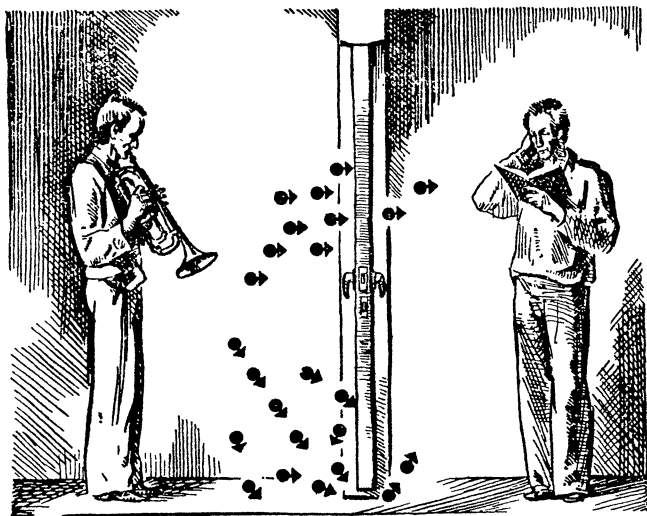
Возможно ли подслушивание через замочную скважину? Если под этим понимать допустимость подслушивания, то каждый считающий себя воспитанным человек должен был бы ответить отрицательно. Но нас интересует не этическая, а физическая сторона вопроса, и тут ответ будет положительным.

Ну и что же? Тривиальная вещь, скажет иной читатель. Но он, пожалуй, изменит свое мнение, если узнает следующее: через скважину можно подслушивать из соседней комнаты даже такую тихую речь, которую человек, находящийся в одной комнате с говорящим (но, естественно, в известном отдалении от него, скажем, у стены вблизи двери), уже не в состоянии отчетливо воспринять.

В самом общем виде дифракцию волн можно определить как явление взаимодействия волн с каким-либо препятствием, находящимся на пути их распространения. Следствием этого взаимодействия могут являться огибание препятствий волной, рассеяние колебательной энергии, интерференционные картины (например, в дифракционной решетке). Усиленная звукопроводность щелей и отверстий в жестких стенках — одно из своеобразных проявлений дифракции звука. Первым еще в 30-х годах нашего века обратил внимание на это явление немецкий акустик Вагнер.

Не будь этого явления, в скольких романах Дюма и других авторов потерялся бы повод для драматических завязок или пикантных ситуаций! Но как же оно протекает? Звук от источника, падающий по большой площади на жесткую непоглощающую стенку, рассеивается в разные стороны. Так как, согласно принципу Гюйгенса, каждая точка фронта волны сама является источником сферической волны, то к отверстию помимо прямого звукового луча от источника придет часть энергии звука, рассеянного прилежащей к отверстию площадью стены. В результате плотность звуковой энергии увеличивается, а отверстие, ввиду малого акустического сопротивления по сравнению с сопротивлением стенки, проводит эту энергию в соседнее помещение. Образуется некая «акустическая воронка». Вагнер показал экспериментально, что влияние отражения звука от стенок как бы равноценно увеличению площади звукопроводящего отверстия во много раз.

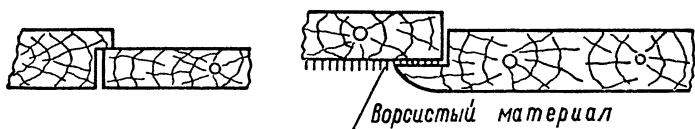
Во сколько же? Здесь имеет значение частота звука. Чем ниже частота, тем больше длина волны и тем с большей площади стены звук приблизительно с одной и той же фазой может «стечь» в «акустическую воронку» — отверстие в стене. Так, по данным Вагнера, коэффициент увеличения эф-



Щель под дверью проводит столько же звука, сколько вся площадь двери.

фективной площади отверстия вследствие дифракции достигает пяти-шести на частоте около 1000 герц. Для низких частот Вагнер дает еще большие значения увеличения звукопроводности отверстий, но к этим данным следует относиться с осторожностью.

А. Контюри, чья книга по строительной акустике получила национальную премию Франции, несложным аналитическим приемом показал, что звукопроводность щелей даже несколько больше, чем звукопроводность отверстий равной площади. Что из этого следует, читатель усмотрит, если даст себе труд проследить за ходом несложного расчета. Дверная створка обычной конструкции проводит от $1/100$ до $1/1000$ энергии падающего на нее звука. Пусть под створкой имеется щель шириной 0,5 сантиметра, то есть площадью примерно в $1/400$ часть площади створки. Если даже на время пренебречь увеличением звукопроводности щели вследствие дифракции, а просто считать, что щель проводит лишь весь падающий на нее прямой звук от источника, то тогда при звукопроводности створки $1/100$ через щель пройдет всего лишь в 4 раза меньше звуко-



Обычный (слева) и хорошо звукоизолированный (справа) притвор двери.

вой энергии, чем через всю дверную створку; при учете же дифракции звуковые потоки через подобную дверную створку и через щель будут соизмеримы. Если взять створку двери с высокой звукоизоляцией (звукопроводность $1/1000$), то та же щель под ней будет проводить уже значительно больше звуковой энергии, чем вся створка. Значит, чем лучше с точки зрения звукоизоляции сама дверь, тем больше ей «вредят» щели по контуру.

Как же с этим бороться? Практикуется обшивка дверей, целиком или хотя бы по контуру, войлоком в клеенке. Пушистые ковры на полу и старинные, хотя и вышедшие из моды драпри вокруг двери уменьшают отражение звука от ограждений и несколько ослабляют звукопроводность щелей. Но наибольший эффект достигается самым простым способом — увеличением перекрытия створкой дверного косяка. Наилучшую с точки зрения звукоизоляции конструкцию двери автор обнаружил в... Музее боярского быта в Москве. Перекрытие створкой двери и краев дверного проема достигает здесь чуть ли не ширины ладони, а соприкасающиеся поверхности для большей плотности покрыты плюшем. К удивлению музейного служителя, посетитель попросил его прокричать что-нибудь из боярского кабинетика. Ничего, кроме смутного намека на человеческий голос, не было слышно! Неграмотные строители тех времен, не имевшие представления об акустических явлениях, не только интуитивно почувствовали, от чего зависит звукопроводность притворов, но и нашли надежные способы звукозащиты.

Повезло судам и кораблям. Двери на них, как правило, герметичные, водонепроницаемые, а значит, и звуконепроницаемые. Но, правда, не все.

Однако мы отвлеклись от объекта первоначального повествования — замочных скважин. И здесь есть старинные рецепты звукозащиты, например массивные металлические пластинки на оси над скважиной по обе стороны двери. Но нужны ли они? Кумушки — любительницы подслушивания как будто исчезают, да и романы, в которых интрига основана на подслушивании, тоже вроде бы менее популярны. Правда, разведчики в романах и повестях и в наше время добывают сведения подслушиванием через замочную скважину или неплотно притворенную дверь.

ВЗАИМНОСТЬ — ДА, ВЗАИМОВЛИЯНИЕ — НЕТ

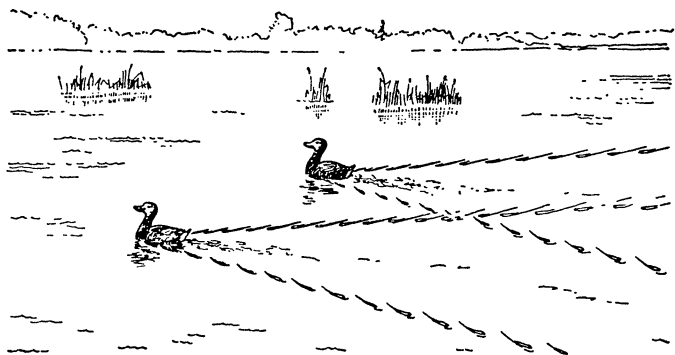
Волна в семействе волн.

В. Гюго

Принципы, принципы — где их нет... Есть они и в акустике — разделе физики. Об одном из них — принципе Гюйгенса упоминалось при изложении краткой истории акустики. Он позволяет понять и объяснить распространение волн в пространстве и может быть сформулирован так: каждая точка среды, вовлеченная в волновое движение, становится источником новой волны, называемой элементарной волной.

Наблюдаемый волновой фронт представляет собой результат сложения множества этих элементарных волн. Отметим, что принцип Гюйгенса справедлив для различных типов волн.

Другой важный принцип, за которым утвердилось наименование принципа взаимности, гласит, что звуковое давление в точке В, развиваемое линейным акустическим источником производительностью Q , находившемся в точке А, равно звуковому давлению, возникающему в точке А при перемещении того же самого источника в точку В. Этот принцип (иногда его называют теоремой взаимности), доказанный Гельмгольцем в 1860 году, позволяет при анализе явлений прохождения звука в средах менять местами положение источника и приемника колебаний, что



Волны, образуемые водоплавающими на поверхности воды, пересекают друг друга без каких-либо взаимных искажений.

иногда бывает удобно или наглядно при математическом анализе колебательного процесса, а также при измерении его параметров. Принцип справедлив для неоднородных и поглощающих сред.

Еще один фундаментальный принцип, именуемый принципом суперпозиции, играет весьма важную роль в любых колебательных движениях. Из него следует, что если встречается несколько звуковых либо иных волн (или если какое-либо тело совершает несколько колебаний), то эти волны (колебания) складываются независимо друг от друга, то есть не влияя друг на друга.

Каждый, кто наблюдал на берегу моря накатывающиеся на мелководье невысокие волны, мог заметить, что при встрече их они без каких-либо искажений формы проходят друг через друга и направление их движения не меняется (скажем попутно, что в данном случае речь идет об особом типе волн, так называемых волнах тяжести, отличных от упругих волн, но и для них справедлив принцип суперпозиции). Видимо, это явление подметил и великий французский романист, когда писал произведение о тружениках моря и выразил свое впечатление в емкой фразе, приведенной в эпиграфе. Да, волна и в семействе волн остается той же, хотя в месте пересечения волн они складываются.

Впрочем, для наблюдения этого явления необязательно идти на берег моря. Достаточно наглядно оно проявляется на поверхности любого водоема, когда, например, по ней проплывают рядом водоплавающие, оставляющие за собой расходящиеся «кильватерные следы».

«ЭТИ В БАРХАТ УШЕДШИЕ ЗВУКИ»

Голос, растекаясь со сцены, как из центра, распространяясь кругами и ударяясь о полости отдельных сосудов, достигает большей звучности и будет вследствие согласия звуков вызывать должное ответное звучание.

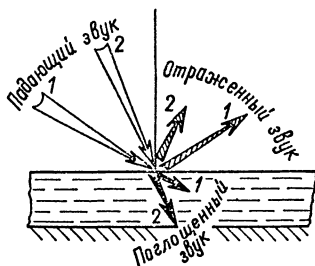
В и т р у в и й. Об архитектуре

Приведенными в названии словами стихотворец (И. Ф. Анненский) не только преподнес читателю поэтический образ, но и (быть может, сам того не ведая) достаточно четко определил физическую сущность процесса звукопоглощения. Да, звуковые колебания, прошедшие в волокнистый или пористый материал, обратно возвращаются лишь в относительно небольшой степени, значительная часть их энергии превращается в теплоту. (Количество ее, как впрочем, и в большинстве звуковых процессов, крайне невелико: подсчитано, например, что если бы жители большого города непрерывно разговаривали в течение суток, то излученной энергии едва хватило бы на то, чтобы вскипятить несколько чашек чая.)

Здесь в отличие от сказанного раньше о резонансном, сравнительно узкополосном поглощении мы говорим о поглощении звука в широкой полосе частот. Для достижения большого звукопоглощения должны быть выполнены некоторые условия, в частности, обеспечены достаточная толщина звукопоглотителя (тем большая, чем ниже частота звука) и отсутствие заметного скачка акустического сопротивления на границе среда — поглотитель.

Рассуждения о переходе звуковой энергии из среды в звукопоглотитель мы почти автоматически относим к случаю нормального падения звука на

«Веер отражения» звука некоторыми звукопоглотителями. Чем больше угол падения звука (к нормали), тем большая часть звуковой энергии не поглощается звукопоглотителем, а отражается им.



поглотитель. Ну а какова будет картина при косом падении звука, лучше или хуже будет звукопоглощение? Можно, казалось бы, рассуждать так: при косом падении звук проходит больший путь в звукопоглотителе, и поглощение должно быть больше.

Последнее заключение — еще один пример того, что упрощенно-интуитивные предположения иногда обманывают. В действительности здесь может быть все наоборот. В дело вмешивается принцип (или гипотеза) нормального импеданса (сопротивления), справедливый для многих звукопоглотителей. Суть его вкратце заключается в том, что при оценке реакции слоя звукопоглотителя на падающую звуковую волну учитывается лишь сопротивление слоя в направлении, перпендикулярном его поверхности.

Кажущийся «непреодолимым» нормальный импеданс приводит к появлению косинусоидальной зависимости поглощения от угла падения звука: звуковая волна, приходящая к звукопоглотителю вблизи от перпендикуляра к его поверхности, лучше поглощается, чем волны, падающие под косыми углами.

Однако советский акустик К. А. Велижанина, посвятившая исследованию звукопоглотителей и процесса звукопоглощения, можно сказать, всю свою сознательную жизнь, приходит к заключению, что в ряде случаев угловые характеристики звукопоглощения могут быть и достаточно причудливыми. К подобным же выводам пришли японские ученые, исследовавшие керамические поглотители, применяемые в конструкциях, работающих на открытом воздухе (например, в автотуннелях).

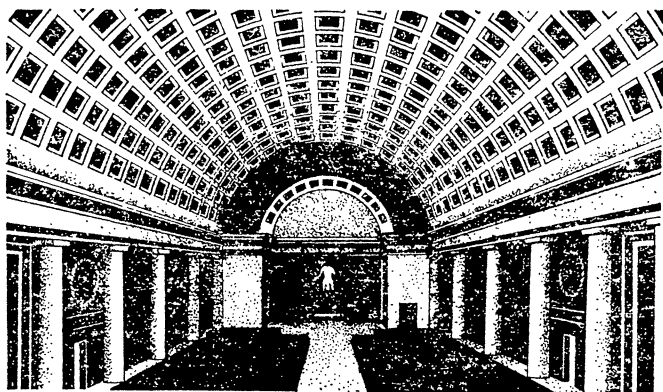
Но вот мы уже подошли к практическому применению звукопоглотителей. Еще Витрувием было подмечено, что в некоторых гулких залах речь оратора трудно разобрать, хотя громкость ее и доста-

точна. Здесь на помощь приходят звукопоглощающие облицовки. Ассортимент их сейчас чрезвычайно разнообразен. Это и маты из минеральной «шерсти», пенополиуретана, и звукопоглощающие штукатурки, и древесно-стружечные плиты, и даже «штучные поглотители» (оставим это название на совести предложивших его, речь идет просто об отдельных локальных звукопоглотителях, подвешенных в каком-либо месте помещения). Благодаря работам Л. А. Борисова, Г. Л. Осипова, Е. Я. Юдина и многих других отечественных ученых и инженеров акустические свойства звукопоглощающих материалов изучены очень хорошо, и выпуск таких материалов в нашей стране налажен в достаточном количестве.

Непосвященный, возможно, счел бы ошибочным высказывание примерно такого рода: «Звукопоглощение в этом зале столько-то... квадратных метров». Однако ошибки нет: за единицу звукопоглощения (полного) принимается один квадратный метр открытого окна (предполагается, что звук, вышедший из комнаты в окно, обратно уже не возвращается, а это для данного помещения равноценно полному поглощению звука). Единица звукопоглощения носит еще название сэбин, по имени американского акустика, внесшего значительный вклад в теорию звукопоглощения в помещениях.

Чем больше общее звукопоглощение в помещении, тем быстрее спадает в нем звук после прекращения действия источника. Практически степень гулкости помещения оценивается временем стандартной реверберации, в течение которого происходит ослабление звуковой энергии в миллион раз. И вот оказывается, что для наилучшего восприятия речи нужно, чтобы время реверберации было в пределах 0,5—1 секунды. Накладываются определенные ограничения на частотную зависимость времени реверберации и зависимость ее от объема помещения.

Музыка требует примерно вдвое большего времени реверберации. При оценке общего звукопоглощения нельзя пренебречь и поглощением, вносимым людьми. Музыканты отчетливо различают разницу в звучании оркестра в зале с публикой и без нее. Поэтому при репетициях оркестров высокого класса в зале поверх стульев настилается ворсистый звукопоглощающий материал. О количественной стороне



Вряд ли можно было более умело сосчитать наличие участков современного эффективного звукопоглотителя с общим классическим стилем интерьера. То, что звукопоглотитель [черные квадраты] не закрывает весь потолок зала, не ухудшает эффекта: звукопоглотителю помогает дифракция.

поглощения звука людьми можно сказать, что звукопоглощение одного человека на средних звуковых частотах близко к поглощению половины квадратного метра открытого окна. Особую роль звукопоглощение имеет в залах с полукруглым или круглым (в планетариях) потолком, с участками параллельных стен. Здесь возможны зоны фокусировки звуковых лучей, или так называемые порхающие эхо. Этих явлений, существенно ухудшающих акустику помещений, можно избежать, нанося на стены более или менее протяженные участки звукопоглотителей.

До сих пор говорилось главным образом о влиянии звукопоглощения на качество акустики концертных залов. Исключительную роль искусственные звукопоглотители приобрели в деле борьбы с шумами. Начать с того, что без тех или иных звукопоглотителей звукоизолирующая конструкция плохо выполняет свою функцию. Она отбрасывает звук обратно, не пропускает его в изолируемое помещение. Но если не поглощать возвращаемый звукоизолирующей перегородкой звук, то его уровень в помещении источника при непрерывной работе источника возрастет, а это, в свою очередь, увеличит звуковую энергию и в изолируемом помещении. К счастью, звук поглощают в той или иной мере все предметы. Все же

введением специальных звукопоглотителей можно добиться снижения громкости шума, скажем, еще вдвое. Как видно, игра стоит свеч. Наиболее эффективен звукопоглотитель как средство борьбы с шумом в длинных низких помещениях, какие, кстати сказать, преобладают на судах. И здесь, в этих «придавленных» помещениях установка звукопоглотителя на потолке особенно целесообразна.

Звукопоглощающие облицовки обязательно ставят там, где надо ослабить шум мощных вентиляторов, выпускных систем двигателей, систем всасывания воздуха, стравливания различных газов. Проходя мимо вентиляционного грибка где-либо неподалеку от станции метро и слыша едва уловимый рокот, мы не представляем себе, какой рев стоял бы здесь, не будь в вентиляционных шахтах звукопоглощающих устройств.

При весьма сильных шумах звукопоглотители ведут себя несколько иначе, чем при слабых. Значительная роль принадлежит нелинейным явлениям, увеличивающим звукопоглощение. Не этим ли, в определенной степени, объясняется эффект, обнаруженный Паркинсоном (разумеется, не Паркинсоном-литератором, а Паркинсоном-акустиком) при исследовании затухания звука в вентиляционном канале, внутренние стенки которого облицованы звукопоглотителем? Оказалось, что вблизи мощного источника затухание звука на единицу длины канала больше, чем на некотором удалении от источника.

Каков бы ни был механизм нелинейного поглощения мощного звука, с точки зрения техники шумоглушения это благоприятное обстоятельство, так как несколько упрощает нелегкую задачу борьбы с шумами.

Строители хорошо знают, что нельзя забывать и о естественных звукопоглотителях. В первую очередь это кроны деревьев и трава газонов — развешенные и расстеленные природой зеленые, впитывающие звук бархаты, с которых мы начали повествование. Они, правда, не столь эффективны, как искусственные звукопоглотители, но все же звук, пролетевший сквозь них или над ними, становится мягче, в нем заметно ослабляются составляющие высоких частот. Это, видимо, подметил К. Дебюсси, когда писал свою фортепианную пьесу «Колокола сквозь листья».

ДИФфуЗНЫЙ ЗВУК — «АКУСТИЧЕСКИЙ МОСТ» В ПОМЕЩЕНИЯХ

Первое занятие в только что отремонтированной аудитории. Безукоризненно гладкий отражающий потолок, стены почти доверху покрыты плотной масляной краской. Тема сегодняшней лекции — акустическое поле в помещениях с частичным поглощением звука. Студентов сравнительно немного (еще не все вернулись с каникул), но присутствующие слушают внимательно, лишь двое в последнем ряду непрерывно болтают. Делаю им замечание.

— Да ведь мы совсем тихо говорим,— оправдывается один из них.

Внезапно приходит мысль: да ведь это великолепная иллюстрация к теоретической части сегодняшней лекции. Прошу говорунов продолжать свой разговор с той же громкостью, подзываю к доске студентку, спрашиваю ее: хорошо ли слышно их.

— Да, как будто рядом находятся,— в ее голосе звучит удивление.

— А теперь,— говорю я,— медленно идите по проходу к дальней стенке и сообщайте нам, изменяется ли громкость голоса говорящих.

— Громкость не меняется,— сообщает она, понемногу продвигаясь вперед.

— Еще несколько шагов,— прошу я.— Как слышно?

— Иду, и все так же слышно. А вот теперь громче стало,— говорит студентка, уже почти вплотную приближаясь к говорящим.

Настала пора объяснить наблюдаемое явление. В помещениях с относительно малым общим звукопоглощением достаточно отчетливо выявляются две составляющие звукового поля. Вблизи от какого-либо источника звука малых размеров существует поле прямой волны, расходящейся от источника по радиусам сферы. Поскольку волна сферическая, то интенсивность звука спадает обратно пропорционально квадрату расстояния. Впрочем, если перейти к звуковому уровню в децибелах над нулевым порогом, то мы получим прямую, спадающую с расстоянием.

На некотором расстоянии от источника спадание звукового уровня с расстоянием прекращается. Мы вступаем в зону так называемого диффузного звука

Картина распределения выраженных в децибелах уровней составляющих звукового поля в помещении с частичным звукопоглощением.



(смотри рисунок). Эта составляющая звука будет одинакова по всему помещению. Обусловлена она многочисленными отражениями звука от стен, потолка, окон, мебели в помещении. А таких отражений в единицу времени происходит достаточно много; например, при средней длине свободного пробега звуковой волны (то есть расстоянии между двумя соседними отражениями), равной 5 м в секунду, происходит около 70 отражений. Столь большое количество отражений, особенно при малом звукопоглощении, приводит к однородности диффузного (размешанного) звука. Он-то и является тем «звуковым мостом», который соединяет слушателя с удаленным от него звуковым источником. Чем меньше звукопоглощение в помещении, его размеры, количество слушателей, тем выше уровень диффузного звука, тем короче зона спадающего прямого звука.

К ослаблению последнего с расстоянием люди привыкли, о возможности же, при определенных условиях, переноса звука в помещении без особого ослабления не все догадываются. И если некоторые полагают, что лектор «капризничает», когда просит слушателей, расположенных довольно далеко от него, прекратить переговариваться, то они ошибаются. А те, кто хочет, чтобы произносимые ими слова не были слышны на достаточно большом расстоянии, пусть попробуют оценить, велик ли в данном помещении фон диффузного звука и на каком расстоянии от говорящего он сравнивается с уровнем прямого звука.

КАК ЗАДЕРЖАТЬ ВИБРАЦИЮ И УДАРЫ

Экономист: «Амортизация — это погашение долга, а также постепенное изнашивание основных фондов, перенесение их стоимости на вырабатываемую продукцию».

Специалист по теории колебаний: «Амортизация — это поглощение, ослабление вибрации и ударов».

Прежде всего возникает вопрос: а зачем надо ослаблять вибрацию? Известно, что вибрация может исправно работать на человека. Различные грохоты, трамбовки, пневматические инструменты, сепараторы, уплотнители бетона — во всех этих устройствах используется колебательное движение.

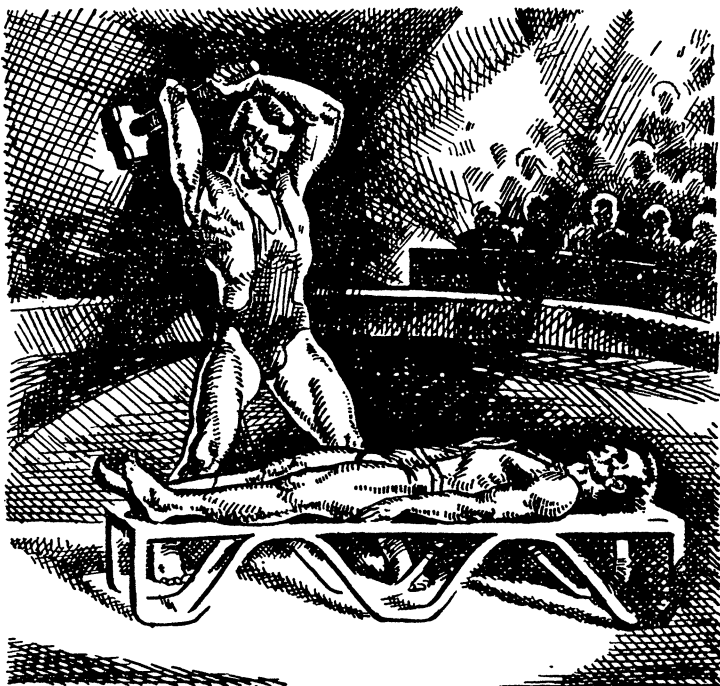
Но вот сам человек сталкивается с теми механизмами, которые он породил. И что же? Вибрационная болезнь стоит на первом месте в длинном списке производственного травматизма. Вибрация — это и шумоизлучение, а о вредности шума мы еще поговорим впоследствии.

Подводный шум от работы судовых механизмов создает помехи для рыбопоисковых приборов; да и обитатели моря боятся этих непривычных шумов. Вследствие вибрации выходят из строя различные приборы, а повреждения от вибрации глубоководных или космических аппаратов, да и наземных транспортных средств могут привести к их гибели.

Итак, бороться с вибрацией нужно. Среди других строительных элементов в роли борца здесь выступает масса. Возможно, еще до инженеров на полезную роль массы для защиты от ударов и сотрясений обратили внимание цирковые актеры. В стародавние времена в малых и больших цирках ведущий программу, указывая на мускулистого атлета с молотом в руках, патетически провозглашал что-нибудь вроде следующего:

— Сейчас знаменитый имярек, с силой которого не сравнится ни один молотобоец в мире, будет наносить удары в грудь своему партнеру, лежащему на арене. Но и этого мало! На грудь ему будет поставлена трехпудовая наковальня!

Едва ли разгоряченная зрелищем публика отдавала себе в этот момент отчет, что наковальня не только не отягчает страдания атлета, как это старался дока-



Ни один атлет, пожалуй, не перенес бы прямого удара тяжелым молотом в грудь.

зять ведущий, но, напротив, спасает ему жизнь. Главное, нужно было лишь выдержать ее вес, да еще незаметное на глаз перемещение в момент удара.

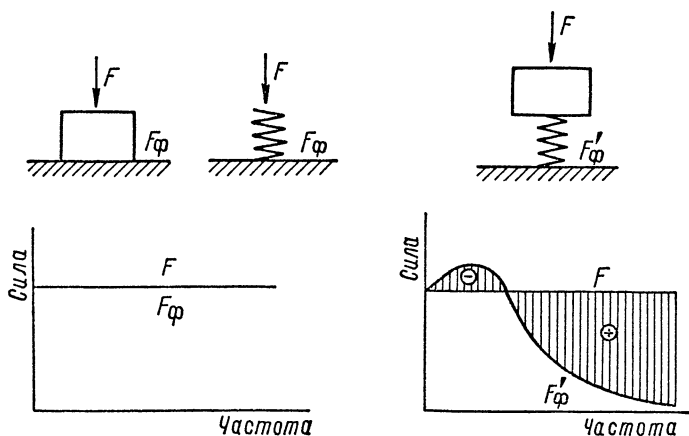
Это динамическое перемещение достойно того, чтобы сказать о нем чуть больше. Ведь если бы не было его, а объект — в данном случае костяк груди человека — был весьма жестким, то не проявились бы инерционные свойства массы наковальни, и практически вся сила удара передалась бы этому лежащему объекту. Применив к колебательному движению второй закон Ньютона, нетрудно убедиться, что сопротивление массы перемещению пропорционально квадрату частоты колебаний. Следовательно, виброзадерживающий эффект массы будет особенно проявляться по отношению к высокочастотным возмущающим силам. На низких же частотах ее эффект может быть недостаточным.



Массивная наковальня, поставленная на грудь циркового артиста, позволяет ему выдержать любой удар молота.

Ну к чему, кажется, «тянуть резину»? Каждому ребенку ясно, что если подложить эту самую резину или пружинку, все будет в порядке, вибрация исчезнет на всех частотах. Но... механизм действия любого упругого элемента не столь уж прост, как может казаться. Начать с того, что пружина передает следующему за ней объекту или конструкции всю колебательную силу, хотя, правда, амплитуда колебаний этой конструкции будет зависеть от соотношения ее сопротивления и жесткости пружины.

Сочетание массы и упругости — это уже лучше, чем одна пружина. Но и тут, как говорил роллановский Кола Брюньон (правда, совсем по другому поводу), взяв зверя, получаешь и рога. При относительно низких частотах сила упругости пружины и сила инерции массы, действующие в противофазе,



При жестком основании (фундаменте) отдельно взятые масса и упругость передают основанию всю вынуждающую силу вне зависимости от ее частоты.

Установка массы на упругий элемент позволяет существенно ослабить передачу колебательной силы фундаменту (кроме узкой области резонанса на низких частотах, где колебания могут усиливаться).

уравновешивают друг друга, возникает резонанс, и колебания даже усиливаются по сравнению с теми, какими они были, когда пружина отсутствовала. Классическая теория виброизоляции, развитая еще С. П. Тимошенко, Д. Ден-Гартогом и другими, показывает, что виброизолирующий эффект системы проявляется лишь начиная с частоты, примерно в полтора раза превышающей резонансную.

Масса, пружина, виброизоляция... Какая же это акустика, возможно, усомнится тот или иной читатель; это просто теория колебаний, часть теоретической механики? Прежде всего, не будем создавать какой-то искусственный водораздел между механикой и акустикой. Ньютон гордился, что он перевел акустику из области музыки, где она давно преуспевала, в лоно механики. Колебательные явления в твердых телах отличаются от колебаний в газах и жидкостях лишь многообразием типов упругих волн, не более. И в английском, и в немецком языке для колебаний в твердых телах существует термин, который можно перевести как «структурный, телесный звук».

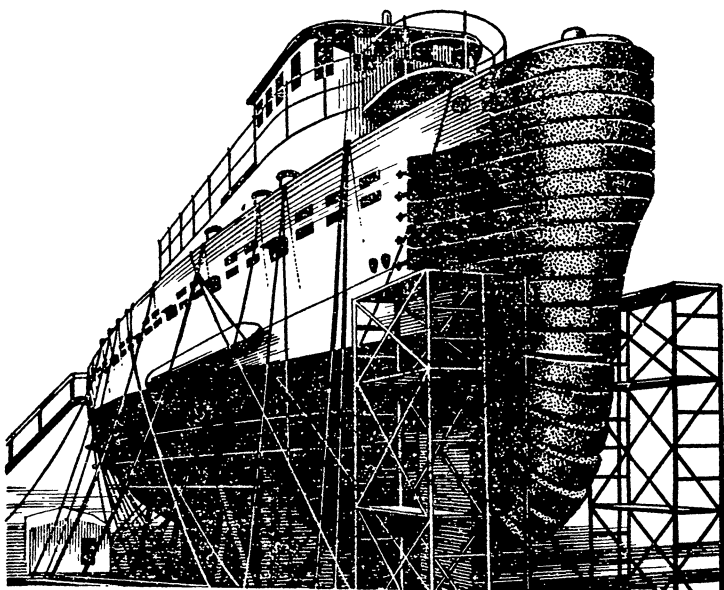
Виброизолированной системе — например, установленному на упругие опоры (это могут быть не только пружины, но и прокладки из резины или пластмассы) виброактивному механизму — свойственны шесть частот свободных колебаний, соответственно числу степеней свободы. При совпадении их с частотами возмущающих сил или моментов возможны более или менее интенсивные резонансные колебания. В нашей стране в области расчета резонансных частот и амплитуд колебаний различных виброизолирующих систем механизмов (колебаний, которые в различных степенях свободы еще и связаны друг с другом) работали Н. Г. Беляковский, О. К. Найдено и другие.

Шесть резонансных частот... Частоты их может занимать на частотной шкале опасный промежуток в несколько десятков герц. Исследуя возможность предельного сужения этого промежутка, автор пришел к выводу, что при наклонах упругих прокладок под некоторыми углами можно не только ликвидировать связь колебаний в различных степенях свободы (это было уже ранее показано другими исследователями), но, что самое главное, свести резонансные частоты в весьма узкий диапазон и значительно уменьшить тем самым опасность как колебаний механизма, так и усиленной вибропередачи фундаменту. Одновременно уменьшаются отклонения механизмов на упругих опорах при наклоне фундамента, что особенно ценно для судовых установок виброизоляции. Когда статья на эту тему была принесена в редакцию журнала «Судостроение», академик Ю. А. Шиманский, бывший тогда редактором журнала, спросил:

— А чем, кроме формул, вы можете это доказать?

Пришлось делать модель механизма на наклонных виброизоляторах. Академик довольно долго дергал за тросики, привязанные в различных частях по высоте «механизма», и, убедившись в правильности утверждений, подписал статью в печать. Наклонная виброизоляция стала применяться на судах.

Конечно, разработка методов расчета колебаний виброизолированных механизмов на низких частотах — это лишь один, достаточно узкий аспект проблемы виброизоляции. Магистральное направление — изучение вибропередачи на средних и высоких



Бывают и такие экзотические амортизирующие устройства. У построенного в США буксира, служащего для подведения кораблей к пирсу, носовая часть во избежание повреждений покрыта упругими резиновыми прокладками.

звуковых частотах, где процесс принимает волновой характер. Были исследованы особенности прохождения колебаний различных частот через сложные структуры, содержащие до семи и более элементов (механизм, несколько каскадов виброизоляторов, промежуточные рамы и блоки, фундамент, конструкция за ним). Найдено, что ослабление вибрации на фундаменте механизма после установки его на виброизоляторы (а это ослабление служит и мерой снижения шума в соседнем помещении), как правило, меньше, чем «перепад» колебательных уровней на виброisolаторах, наиболее просто измеряемый на готовой установке механизма с упругими опорами. В. И. Попков впервые рассчитал и измерил в широком диапазоне звуковых частот колебательную энергию, передаваемую через виброизолирующие крепления.

За рубежом интересные работы по виброизоляции были выполнены Кремером, Кридом, Сноудоном и другими.

Не покажутся ли некоторым читателям, особенно

молодым, слишком уж «будничными» вопросы вибрации? Ведь здесь нет лазеров, прожигающих на расстоянии стальные листы, миллионноградусных плазменных шнуров, бьющихся в чудовищных магнитных полях. Читатель должен поверить, однако, что радость обнаружения нового явления или закономерности, игра ума при этом одинаковы, независимо от того, участвуют ли здесь тысячи киловатт мощности, кулонов, атмосфер или только колебательное движение с амплитудами в доли микрона, сопровождается ли это явление броскими внешними аксессуарами или нет.

При создании массовых амортизаторов для машин встал вопрос о виброизолирующем материале. Еще в 40-е годы в разных странах в качестве амортизационных материалов рекомендовались пробка, фетр, резина. Исследование их на специально созданных установках склонило чашу весов в пользу последней.

Тут следует учесть одно интересное свойство резины. Дело в том, что она практически... несжимаема, во всяком случае значительно менее сжимаема, чем сталь. Часто отождествляются два понятия: модуль сжатия и сжимаемость. Модуль сжатия (модуль Юнга) у резиновых стержней действительно на несколько порядков меньше, чем у стали. А вот сжимаемость, характеризующаяся уменьшением объема при сжатии, у резины (разумеется, мы говорим о сплошной резине, без внутренних пор) ничтожна, то есть ее деформация происходит не за счет изменения объема, а лишь за счет изменения формы (физик сказал бы, что коэффициент Пуассона резины близок к предельно возможному — 0,5, а у стали он не превышает 0,25). Боковые поверхности резинового виброизолирующего элемента при колебаниях, как говорят, «выпучиваются». Если же эти поверхности закрыты металлической арматурой, возможность боковых смещений исключается, и жесткость прокладки увеличивается в десять и более раз. Резина буквально превращается в дерево, виброизоляция ее падает.

Это обстоятельство, а также необходимость обеспечить надежное крепление механизмов в любом положении (в том числе подвешенном) были учтены при разработке резинометаллических упругих опор

для судов. Амортизаторы сварные — так в резинотехническом производстве именуют изделия, в которых резиновый массив присоединен к металлической крепежной арматуре в процессе вулканизации, происходящей при достаточно высокой температуре. Почему амортизаторы, а не виброизоляторы? Потому что они не только изолируют структурный звук, но и смягчают толчки, удары, а последних много на транспортных средствах, особенно на судах (толчки о пирс, удары волн, соударения при качке и т. п.).

Вспоминается момент, когда после долгих исканий «производство пошло»; из пресс-форм одно за другим начали появляться аккуратные гладкие и прочные изделия с заданными акустическими характеристиками. Было это ровно 40 лет назад. С тех пор освоены многие значительно более сложные типы виброизоляторов — пружинно-резиновые, пневматические и другие. Большинство конструкций не выдержали «испытания практикой», но первые их образцы и сейчас являются одним из самых ходовых изделий этого вида. Их выпущено уже много миллионов, они используются не только на судах, но и на других видах транспорта, в промышленности, жилищном строительстве. Самые маленькие амортизаторы служат для защиты легких хрупких приборов от сотрясений, самые большие — для виброизоляции довольно тяжелых виброактивных механизмов.

Уместно вспомнить теперь о явлениях отражения колебаний на границах сред или конструкций. Главное условие для такого отражения — скачок механического или акустического сопротивления, независимо от того, в какую сторону — уменьшения или увеличения. Виброизоляторы или упругие прокладки являют собой пример виброзащитной конструкции, действующей прежде всего вследствие резкого уменьшения сопротивления в месте перехода от металлического вибропровода к резине или иному весьма податливому материалу. Можно применить и другое виброизолирующее устройство, использующее эффект отражения колебаний из-за местного увеличения сопротивления. Это — массы, протяженные в направлении, перпендикулярном направлению распространения вибрации. Весьма часто шум в судовых помещениях обусловлен именно вибрацией их ограждений, проходящей из машинного отделения. Судовые акустики на танкере «София» сделали такой опыт. По периметру пола

одной из кают были уложены массивные металлические брусья. Симметричная каюта по другому борту была оставлена без изменений. Громкость шума в первой каюте оказалась в полтора раза меньше, чем во второй. Однако при использовании подобных виброзадерживающих масс не удастся все же добиться такого большого скачка сопротивления, а следовательно, и акустического эффекта, как с помощью виброизоляторов. Действие местных виброзадерживающих масс и различные аспекты их применения были подвергнуты обстоятельному анализу Л. Кремером, А. С. Никифоровым, В. Т. Ляпуновым.

В некоторых случаях скачок сопротивления можно получить, введя линии и цепочки упругоинерционных систем — антивибраторов. Максимумы виброизолирующего эффекта этих резонансных систем, как ни странно, оказались не на частоте резонанса, а по обе стороны от нее. В данном случае резонансная система ведет себя, как более или менее широкополосное виброзадерживающее средство. Однако, как и в некоторых других виброзащитных средствах эффект виброизоляции здесь сопровождается еще и местным, локальным ослаблением вибрации в диапазоне частот. Представляется, что термин антивибратор, предложенный еще Ден-Гартогом, весьма подходит для подобных устройств с комбинированным действием.

КОЛЕБАНИЯ ВСТРЕЧАЮТСЯ С ТРЕНИЕМ

Теплота есть завершение звука.

Г. Гегель. Философия природы

Разогреваются (при игре) не только музыканты, но и инструменты.

Там же.

Итак, «три кита» в области борьбы с шумами были известны в строительной акустике достаточно давно. Составим табличку этих средств:

Звукоизоляция	Звукопоглощение
Виброизоляция	

Очевидно, ощущалась пустота одной клетки этой таблички, чувствовалось, что раз есть звукопоглощение, то, видимо, должно быть и вибропоглощение. Ведь недаром, как упоминалось выше, в ряде стран звуковую вибрацию, то есть колебания звуковой частоты в твердых телах, именуют структурным, или телесным, звуком.

— Позвольте,— возможно, скажет кто-нибудь из читателей, имеющих отношение к строительной механике или к различного рода механизмам,— но ослабление вибрации механизмов с помощью виброгасителей, предложенных и исследованных Тимошенко, Ден-Гартогом и другими, тоже известно довольно давно.

Да, действительно, виброгасители для механизмов, различные демпферы применялись и ранее. Но эти гасители использовались (и используются) для ослабления колебаний на отдельных резонансных частотах не превышающих десятков герц, причем масса таких гасителей достигает иногда нескольких сот или даже тысяч килограммов. Любопытно, что эффект такого гасителя тем больше, чем меньше в нем потери на трение.

В нашем же случае речь уже шла о создании легкого и удобного средства поглощения вибрации строительных конструкций одновременно в широком диапазоне слышимых частот. Из этих конструкций следует упомянуть прежде всего корпуса, палубы, переборки судов. Строительство различного рода судов началось после Великой Отечественной войны бурными темпами, и сразу же выяснилось, что во внутренних помещениях судов очень шумно — ведь металл хорошо проводит звуковую вибрацию. Требуемое средство было найдено, причем можно уверенно говорить здесь о приоритете отечественной науки и техники. В 1946 году автором этой книги было обнаружено, что нанесение на металлические листы резин и пластмасс сильно увеличивает затухание колебаний листов в широком диапазоне частот.

Уже через несколько лет демпфирование металлических конструкций стало обычным явлением, но тогда оно еще не успело получить признания, доказательством чего явилась полемика автора предложения с патентными организациями.

Вначале пришел отказ. Мотивировка: облицовка корпусных конструкций резинами и пластмассами из-

вестна из ряда зарубежных патентов. Что же, беремся за изучение этих патентов. Оказывается, в одном случае применения полимерных материалов имело целью защиту от скольжения при хождении по палубе, в другом — защиту стенок танков судов, перевозящих кислоты, от их действия и т. д. и т. п. Нанесение же подобных материалов с целью увеличения механических потерь в конструкциях не предлагал ранее никто.

Свидетельство на изобретение было выдано (№ 119084 с приоритетом от 2 августа 1947 г.)*, но до введения этого средства на судах было еще далеко. Требовалась «наглядная агитация». В лаборатории были подвешены на тонких нитях две стальные пластины, вырезанные из обшивки судового корпуса. Одна пластина — в «натуральном» виде, другая облицована вибропоглотителем. Тут же висел деревянный молоток.

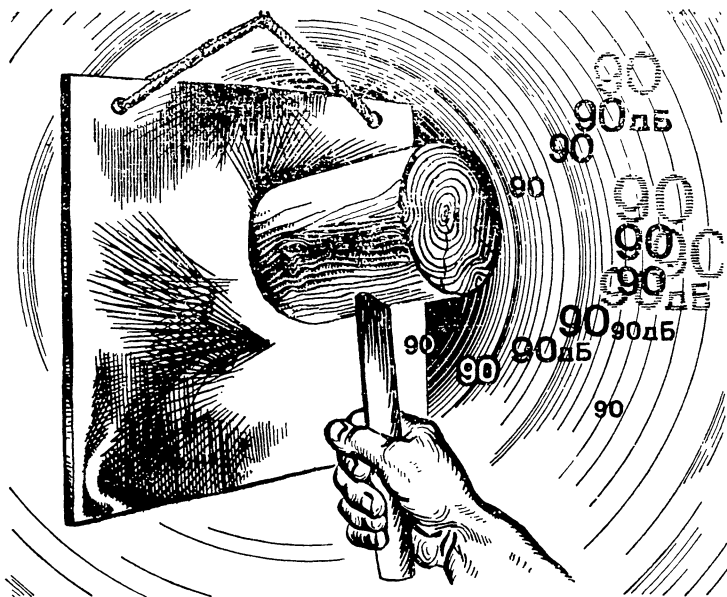
Заказчику предлагалось стукнуть последовательно по обеим пластинам. Удар по первой пластине — в воздухе разливается «малиновый звон», не хуже ростовских и суздальских колоколов. Теперь ударяем по пластине с вибропоглотителем (со стороны непокрытого металла). Что же? Как будто бьют по дереву или листу толстого картона. Введенное в конструкцию трение «спилило» гребенку резонансов конструкций. И шумомер показывает уровень шума на 10—15 единиц меньше (об этих единицах — децибелах или фонах — мы еще поговорим во второй части книги). Чем большим трением обладал демпфирующий слой, тем больше он заглушал излучаемый шум.

Простой опыт убеждал больше, чем расчеты, тонкие лабораторные исследования, прогнозы. Моряки и судостроители стали склоняться к применению средств вибродемпфирования в судостроении.

Через несколько лет, в начале 50-х годов, в иностранной печати начали появляться первые публикации по вибродемпфированию. Насколько помнится, это были статьи Минке, Ван-Иттербека о глушении шума бетономешалок и камнедробилок с помощью демпфирующих слоев. Весьма эффективные синтетические вибропоглощающие покрытия были созданы Оберстом (ФРГ).

На III Международном конгрессе по акустике, про-

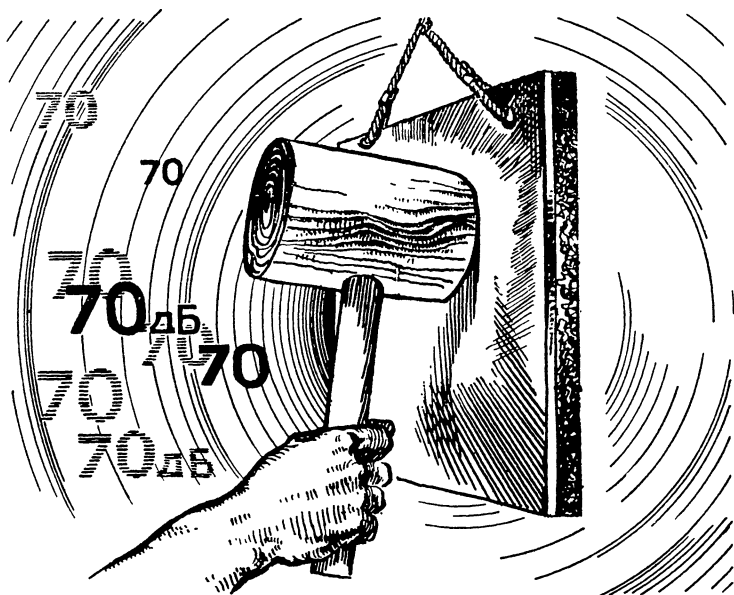
* Бюллетень изобретений, 1959, № 7.



Сколь убедительным может быть удар деревянного молотка по покрытию (даже не со стороны удара), уровень неприятного слышимого шума мером,

ходившем в сентябре 1959 года в Штутгарте (ФРГ), внимание участников привлекло объявление, в котором предлагалось записываться на экскурсию в Мюнхен на специальном звукозаглушенном поезде, в котором были широко применены вибродемпфирующие покрытия.

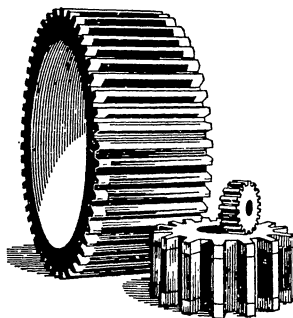
Да, поезд был заглушен хорошо. В вагонах можно было разговаривать вполголоса. Автор этих строк смотрел на проносившиеся мимо поля цветущей Баварии, и в памяти всплывали лица суровых судовых заказчиков, десять лет назад недоверчиво рассматривавших в лаборатории первые вибродемпфирующие покрытия для металлических конструкций. В соседнем вагоне ехали американец Кервин, немцы Хекль и Куртце, советский ученый Б. Д. Тартаковский, сделавшие накануне на конгрессе доклады о вибропоглощающих покрытиях. Впоследствии ряд вопросов теории вибропоглощения разработали А. С. Никифоров, Б. Д. Тартаковский и другие.



в стальной лист! Когда на листе имелось вибродемпфирующее звука, излучаемого листом в окружающее пространство и фиксированно уменьшался.

В наше время вибропоглощающие покрытия применяются в транспортных средствах и машинах исключительно широко. Уже на одном из голландских пассажирских судов постройки 1967 года вибропоглощающими покрытиями было облицовано более 2000 кв. метров корпусных конструкций. Этот год с точки зрения виброакустики был знаменателен тем, что в г. Левене (Бельгия) собрался первый Международный симпозиум по вибропоглощающим слоям и покрытиям.

Теперь вопросы вибродемпфирования конструкций являются неперенным предметом обсуждения на всех акустических конференциях, симпозиумах. И хоть растет энергонапряженность машин и механизмов — главных источников раздражающей вибрации и



Малошумные шестерни с зубьями из текстолита.

шума, этим шумам удастся ставить заслон, в частности, в виде нанесенных на них материалов и конструкций с весьма большим внутренним трением.

ЕСТЬ ЛИ ЧТО-НИБУДЬ НЕ ПОЮЩЕЕ В МИРЕ?

Запели тесаные дроги...

С. Есенин

Пытаются шептать клочки афиш,
Пытается кричать железо крыш,
И в трубах петь пытается вода,
И так мычат бессильно провода.

Е. Евтушенко

...Восход солнца! Показалось мне,
Что статуя те звуки издавала.
То — Музыка прошедшего.

Надо записать и передать затем на
обсуждение специалистов (Заносит
в записную книжку).

Г. Ибсен, слова Пер Гюнта
перед мемнонским колоссом

До сих пор речь шла о колебаниях, вызванных преимущественно периодическими силовыми воздействиями. Имеется, однако, весьма обширный класс колебаний, источником которых может служить какой-либо постоянный фактор: поток жидкости или газа, гидростатическое давление, постоянная сила натяжения, гравитации, трения, электродвижущая сила и т. п. Такие колебательные движения носят название автоколебаний. В обыденной жизни мы, возможно, сами того не замечая, встречаемся с автоколебаниями чаще, чем с колебаниями, вызванными периодическими силами.

Начнем с автоколебаний природного происхождения. Вой ветра в ветвях деревьев, в горах (вспомните у Тютчева: «Скалы поют, как кимвалы»). Это примеры автоколебаний вихревого характера, но продуктом воздействия постоянного возмущающего фактора могут быть и автоколебания строго периодического характера, одно- или многотональные.

Знаменитый мореплаватель Ф. Чичестер указывает, что «ревушие сороковые» именуются так не за шум

разбивающихся волн, а именно за рев и вой ветра в снастях судов. Чичестеру во время «одионочной кру-госветки» пришлось изучать язык своего судна.

— Каждый вздох, треск или грохот что-то означал; даже каждый оттенок завывания ветра в грот-штаге имел свой смысл.

Со временем Чичестер смог по звукам вполне точно определять скорость и направление ветра.

В великолепной монографии У. Брэга «Мир света, мир звука» (к сожалению, сейчас капитальные научно-популярные книги все больше вытесняются брошюрками-однодневками) имеется глава «Звуки деревни». Здесь что ни звук, то автоколебание. Стрекотание кузнечиков и цикад, журчание ручья, мычание и блеяние животных, звуки, издаваемые домашними и дикими птицами.

А голос человека? Разве это не важнейший (по крайней мере, для него самого) автоколебательный процесс? В основе его находится движение постоянного потока воздуха из легких, модулируемого колебаниями голосовых связок. Тончайшие фиоритурь модного колоратурного сопрано из столичного оперного театра и грубый рев быка с точки зрения физики звукообразования совершенно идентичны.

Упомянем о природных автоколебаниях несколько экзотического свойства. Поющие пески... Еще в XIV веке великий путешественник Марко Поло упоминал о «звучащих берегах» таинственного озера Лоб-Нор в Азии. За шесть веков поющие пески были обнаружены в различных местах всех континентов. У местного населения они в большинстве случаев вызывают страх, являются предметом легенд и преданий.

— Когда боги смеются, берегись! — предостерегающе крикнул старик. Он начертил пальцем круг на песке, и пока он чертил, песок выл и визжал; затем старик опустился на колени — песок взревел и затрубил, — так описывает Джек Лондон встречу с поющими песками персонажей романа «Сердца трех», отправившихся с проводником на поиски сокровищ древних майя.

Есть поющие пески и даже целая поющая песчаная гора и у нас в стране. Неподалеку от реки Или в Казахстане поднялась почти на 300 метров гора Калкан — гигантский природный орган. При ветре и даже при спуске с нее человека гора издает мелодичные звуки. После дождя и во время штиля гора безмолвствует... Барханная система Аккум-Калкана объявлена теперь

государственным заповедником. Некоторые дюны на Куршской косе издают при ветре глухое ворчание и как бы глубокие вздохи. В давние времена эти явления приписывались здесь мифическому владыке — Волнодую. Подобные акустические явления наблюдаются и на 30-километровом пляже в южной части штата Керала (Индия).

Первым, кто попытался исследовать поющие пески, был, по-видимому, тот же У. Брэгг. Он попросил прислать немного «звучащего песка» с острова Эйг в Шотландии и убедился, что песок звучит даже в деревянной чашке, если ударять по нему пестиком. Вот что пишет об этом Брэгг в своей монографии:

Исследуя песок под микроскопом, можно найти, что он состоит из более или менее одинаковых, но вполне шарообразных зерен. Если примешать к нему немного грязи... или если часть песка, растираясь, превращается в порошок, то шум слабеет или совсем прекращается. Песок снова приобретает свои свойства, если отмыть от него порошок.

Аналогичными исследованиями занимался и советский ученый В. И. Арабаджи. Этого специалиста, по-видимому, всегда влекли к себе необычные акустические явления в природе. Раскрыв очередной номер Акустического журнала АН СССР и увидев в оглавлении фамилию Арабаджи, можно было заранее сказать, что речь пойдет об анализе шума грома, тайфунов или водопадов, звуков в пещерах и подземных галереях. Арабаджи предположил, что излучающий звук верхний слой песка движется при каком-либо постоянном возмущении по нижнему, более твердому слою, имеющему волнистый профиль поверхности. Вследствие сил трения при взаимном перемещении слоев и возбуждается звук. Примерно так же объясняют генерацию звука движущимися песками некоторые иностранные ученые.

Если есть «звуки земли», то почему бы не быть голосу моря? Именно этим именем были наречены В. В. Шулейкиным инфразвуковые колебания, возникающие при движении ветра над гребнями морских волн. Академик Шулейкин не только открыл это явление, но и предложил использовать его для прогнозирования штормов с помощью специальных шаров-зондов, размещаемых на морских берегах.

Многочисленны и многообразны создания рук человеческих, в которых возникают и используются автоко-

лебания. Прежде всего, это различные музыкальные инструменты. Уже в глубокой древности — рога и рожки, дудки, свистульки, примитивные флейты. Позже — скрипки, в которых для возбуждения звука используется сила трения между смычком и струной; различные духовые инструменты; гармонии, в которых звук производят металлические язычки, колеблющиеся под действием постоянного потока воздуха; органы, из труб которых вырываются через узкие щели резонирующие столбы воздуха.

У какого из архитекторов далекого прошлого возникла мысль создать гигантский орган, звучащий под воздействием естественных потоков воздуха? Да к тому же совместить его с величественным изваянием одного из фараонов, правившего в XIV веке до нашей эры? Кто бы это ни был, приходится удивляться интуиции творца этого памятника и практическими представлениями его в области акустики.

Пора удовлетворить законный интерес читателя. Конечно же, речь идет о знаменитом мемнонском колоссе, гигантском звучащем изваянии, установленном вблизи египетского города Луксора. Высота статуи около 20 метров, масса достигает тысячи тонн. В нижней части колосса обнаружен ряд щелей и отверстий с расположенными за ними камерами сложной формы.

Акустик из ФРГ О. Бшорр в течение года вел наблюдения за звуками, издаваемыми статуей, записывал их на магнитофон и подвергал спектральному анализу. Выступление его на токийском Международном конгрессе по акустике послужило лишним примером того, насколько несправедливо бытующее мнение об ученых, как сухих черствых людях, которым чуждо все человеческое. Когда наступило время доклада Бшорра о мемнонском колоссе, то в аудитории поистине негде было яблоку упасть. В соседних же аудиториях, где заседали другие секции конгресса, было пусто.

Докладчик начал с сообщения о том, что более чем в ста греческих и латинских документах разных времен упоминается пение колосса. Один из авторов документов (Страбон) указывает, что статуя имитирует голос человека. После реставрации памятника императором Септимием Севером в 199 году н. э. эта способность была утрачена памятником.

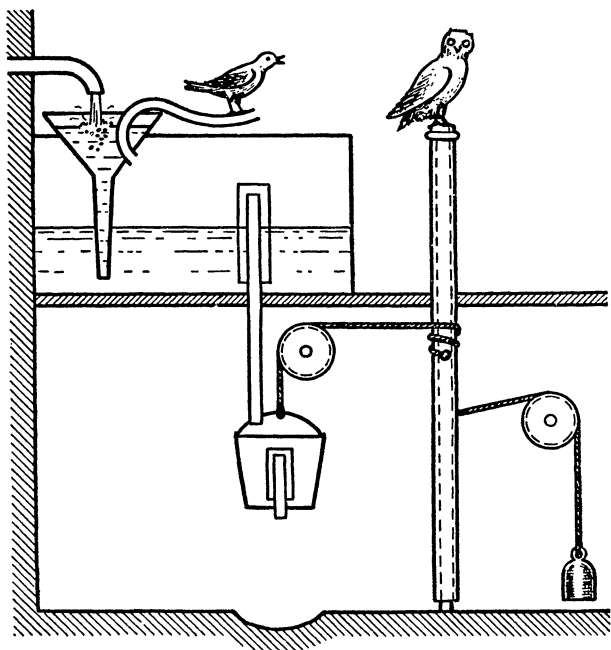
Что же показали регулярные наблюдения? Летом статуя звучит после 5 часов утра, зимой — после

7 часов. Звук мелодичный, продолжается 1—2 часа. Несомненно, что он вызывается восходящими потоками воздуха, нагреваемого утренним солнцем. Однако установить точную физическую картину звукообразования не удалось. Было высказано более десяти различных предположений на этот счет, как то: ветровой эффект, эолова арфа, колебания резонаторов Гельмгольца, эффект Тревельяна (колебания при соприкосновении с нагретой поверхностью) и т. п. Весьма вероятно одновременное действие нескольких механизмов возникновения «пения».

Следует, таким образом, констатировать, что взятая на себя Бшорром миссия по изучению поющего колосса не увенчалась полным успехом, и это оригинальнейшее творение мастеров далекого прошлого еще ждет своих исследователей.

Были ли последователи у древних творцов поющих памятников? Были, и, вероятно, некоторые из них добились успеха. Для нас главный интерес представляет поющий памятник легендарному казахскому сказителю X века Коркуту, открытый в 1980 году в местечке, с давних пор носящем его имя. Памятник состоит из четырех высоких стел, выполненных по проекту алмаатинского архитектора Бека Ибраева в форме кобыза — национального народного инструмента. Сооружение поет на ветру. Эффект достигается с помощью трубок, смонтированных в верхней части памятника. Научному сотруднику С. Исатаеву пришлось много потрудиться, чтобы конструкция трубок издавала звук по тембру, напоминающий звучание кобыза.

В древние времена появлялись и другие прихотливые сооружения, звучащие под действием какой-либо постоянной энергии. Знаменитый греческий математик и механик Герон изобрел любопытный автомат «поющая птичка», в котором использовалась потенциальная энергия воды и гирь, поднятых на некоторую высоту. Благодаря подбору двух сифонов и системы тросов с винтом птичка свистела, пока строгая сова на нее не смотрела, и умолкала, как только сова поворачивалась к ней. По мере опорожнения резервуара сова отворачивалась от птички, и цикл начинался сначала. Известны остроумные автоматы — флейтисты и кларнетисты, создававшиеся в средние века.



Поющая птичка и сова Герона.

Перейдем, однако, от уникальных сооружений старины к научно-техническим творениям современности. Используя автоколебательные системы и принципы, удалось создать много нужных машин, приборов, механизмов. В разработанных человеком устройствах особенно отчетливо выделяются три элемента, необходимых для осуществления автоколебательного процесса. Это — какой-либо источник постоянной энергии, собственно автоколебательная система и тот или иной регулятор поступления энергии в систему.

Возьмем, например, паровую машину. Источник энергии здесь — паровой котел, регулятор поступления энергии в движущийся механизм — золотник, а сама автоколебательная исполнительная система — движущийся в цилиндре поршень, связанный с колесами локомотива с помощью штока, шатуна и кривошипа.

В обычных часах источником потенциальной энергии служат заведенная пружина или поднятые гири, а распределителем — анкерный механизм, который

приводит в периодическое движение маятник и зубчатые колеса, связанные со стрелками. Разнообразные пневматические устройства, сирена, электронные генераторы и многие, многие другие автоколебательные системы также исправно служат людям.

Но довольно часто, к сожалению, возникают и нежелательные автоколебания, приводящие к повреждению и даже разрушению сооружений и устройств, а иногда и к гибели людей. В сравнительно недалеком прошлом известны случаи, когда обрушивались от колебаний неправильно рассчитанные мосты при сильных ветрах и ураганах. Для предотвращения разрушения высоких металлических труб, находящихся в ветроопасных местах, был предложен остроумный прием, заключающийся в наварке на наружной поверхности труб по пологой винтовой линии сравнительно тонких невысоких ребер. Эти ребра, уводя обтекающую трубу горизонтальный ветровой поток вверх, препятствовали возникновению за трубой пагубных для нее мощных вихрей.

Большую опасность в котельных установках (в том числе судовых) представляют автоколебания трубок под воздействием постоянных потоков воды или пара. Изменением конструкции трубок, увеличением расстояния между ними для предотвращения их соударений удастся в большинстве случаев защитить котлы от выхода из строя.

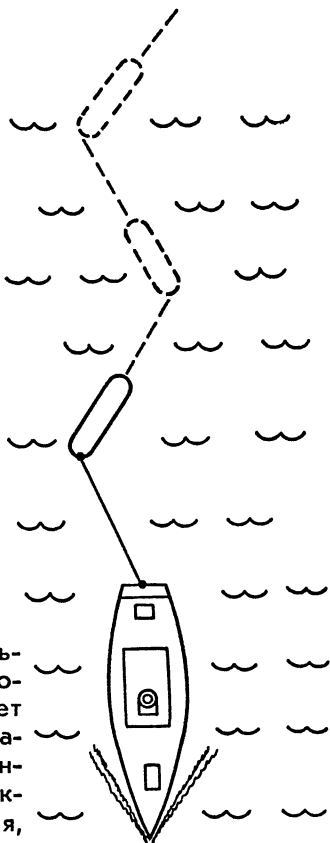
Два вида автоколебательных процессов вошли как печальной памяти явления в историю самолетостроения и воздухоплавания. Первое из них имеет профессиональное название флаттер. Этому автоколебанию подвержены плоскости самолета и его хвостовое оперение. Само название (англ. flutter — трепетание) указывает на характер явления. Оно сродни колебаниям листьев на ветру (вспомните, как трепещут на своих податливых черенках листья осины). О сорвавшихся с деревьев листьях никто печалиться не станет, на самолете же флаттер буквально за несколько секунд может привести к разрушению плоскостей или оперения и связанным с этим страшным последствиям. В настоящее время достаточно сложный механизм флаттера полностью выяснен и части самолетов рассчитываются так, чтобы это опаснейшее явление не могло возникнуть.

Другим опасным колебанием явилось шимми — ви-

ляющие движения колеса шасси (преимущественно переднего) при посадке самолета, могущие вызвать его аварию. Как известно, шимми был модным танцем 20-х годов; возможно, это название было использовано авиаторами потому, что виляющее движение колеса в плане несколько напоминало движение ног у исполняющих танец. «Автоколебательный танец» был под стать различным «автоколебательным пениям». Теория шимми была дана М. В. Келдышем. Введение в самолетные шасси демпферов и добавочных шарниров позволило исключить аварии и вследствие шимми.

Роль виляющих колебательных движений в технике вообще не так мала, как может казаться. При буксировке плавучих емкостей с определенной скоростью могут возникнуть виляющие автоколебания, приводящие к отрыву буксирных тросов и даже к повреждению самих емкостей.

Судоводители, впервые обнаружившие это явление, по-видимому, не знали, что Рэлей предсказал возможность таких колебаний еще в конце прошлого века на основании результатов весьма изящного опыта. За отсутствием устройств, сообщающих жидкости прямолинейное движение, им был использован наполненный водой сосуд относительно большого диаметра, вращаемый вокруг вертикальной оси. Когда у стенок сосуда, где скорость движения жидкости наибольшая, в воду был опущен груз маятника, то помимо естественного постоянного отклонения по течению жидкости он начал совершать также колеба-



Автоколебания буксируемой плавучей емкости (вид в плане).

тельные движения в перпендикулярном направлении.

Итак, мы коснулись автоколебаний приятных (некоторые музыкальные звуки), автоколебаний полезных (составляющих основу устройств некоторых машин и приборов), наконец, автоколебаний опасных. Есть также автоколебания пусть не особенно опасные, но в достаточной степени раздражающие. Кому из нас не приходилось воевать уже не с поющими, а с ворчащими, рычащими, стонущими трубами в ванной? А скрипы плохо смазанных петель, дверных створок, касающихся пола? Впрочем, не всегда и не всех эти звуки раздражали. В повести Гоголя «Старосветские помещики» есть строки, свидетельствующие, что подобные автоколебания могли умилять:

Но самое замечательное в доме — были поющие двери. Как только наставало утро, пение дверей раздавалось по всему дому. Я не могу сказать, отчего они пели: перержавевшие ли петли были тому виною, или сам механик, делавший их, скрыл в них какой-нибудь секрет; но замечательно то, что каждая дверь имела свой собственный голос: дверь, ведущая в спальню, пела самым тоненьким дискантом; дверь, ведущая в столовую, хрипела басом; но та, которая была в сенях, издавала какой-то странный дребезжащий и вместе стонущий звук, так что, вслушиваясь в него, очень ясно, наконец, слышалось: батюшки, я зябну!

И далее Гоголь пишет:

Я знаю, что многим очень не нравится сей звук; но я его очень люблю, и если мне случится иногда здесь услышать скрип дверей... боже, какая длинная навевается мне тогда вереница воспоминаний!

Интересно, что сказал бы Гоголь или его милые старики, если бы рядом с ними раздался скрип, вернее, страшный визг тормозов современного автомобиля? Едва ли хоть когда-нибудь и у кого-нибудь эти звуки наших дней смогли бы вызвать милые воспоминания...

ПОБЕДНОЕ ШЕСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Соколов намного обогнал свое
время...

Г. Ч е д д. Звук

Май 1938 года. Наш учитель, профессор Ленинградского электротехнического института С. Я. Соколов, входит в аудиторию.

— Что-то вас маловато сегодня. Ясно, до сессии еще далеко, а погода хорошая. Пойдем и мы погуляем. Возражений нет?

Возражений, разумеется, нет. Видимо, профессор что-то задумал. Группа студентов проходит со своим преподавателем мимо первой в стране лаборатории электроакустики, размещающейся в старой церкви. За ней — парк, тянущийся до одного из рукавов Невы. Соколов обращается к студентам:

— Хочу поговорить сегодня с вами о перспективах применения ультразвука. Сейчас в них мало кто верит, а они будут гигантскими, и вы еще сами убедитесь в этом. Кстати, несколько лет назад на этих вот деревьях осенью, когда ветви были без листьев, я развесил восемьсот метров стальной проволоки и убедился, что затухание звука, в том числе и ультразвуковой частоты, в металлах ничтожно.

Вы знаете об успехах нашей лаборатории в ультразвуковой дефектоскопии металлов,— продолжал Сергей Яковлевич.— Так вот, ультразвук будет просвечивать и тело человека, причем в отличие от рентгеновских лучей это совершенно безвредно. С помощью ультразвука мы уже сделали эмульсию ртути с маслом и водой. Если мощность звукового излучения достаточна, можно эмульгировать практически любые компоненты. Но и это далеко не все. Пробовали на металлургическом заводе облучать ультразвуком расплавленный металл. Зернистость его уменьшилась во много раз. Можно получать сплавы с высокой степенью однородности структуры. Можно применять ультразвук и для очистки изделий, для соединения металлов друг с другом. А влияние ультразвука на химические реакции? Ведь это поистине безграничная область.

— Сергей Яковлевич, а где все это описано?— спрашивает кто-то из нас.

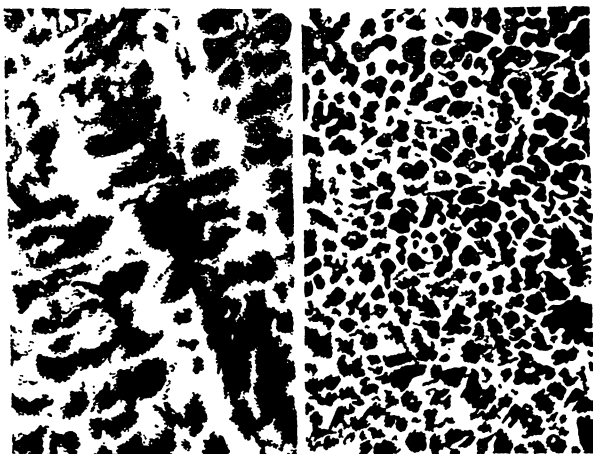
— Публикуем понемногу результаты в журналах. Но мыслей столько, что не успеваем все описывать. В общем, применения ультразвука будут чрезвычайно многообразны, и очень важно создать электронно-акустический преобразователь, делающий видимым любое ультразвуковое изображение. Сейчас наша кафедра совсем близка к созданию такого преобразователя. (Он вскоре и был создан С. Я. Соколовым.— И. К.)

Прошло несколько десятилетий. Просматриваю книги по применению ультразвука: «Ультразвуковая технология», 1974; «Ультразвук в машиностроении», 1974; «Применение ультразвука в промышленности», 1975, и более поздние издания. Конечно, техника значительно усовершенствована, вскрыты многие новые закономерности, но некоторые из основных направлений в применении ультразвука все те же, о которых мы слышали в довоенные студенческие годы. Может быть, в этих монографиях упомянуто хотя бы вскользь имя основателя советской (и, по существу, мировой) ультразвуки, предвосхитившего многие применения ультразвука? Нет, в этих отечественных изданиях (в отличие от некоторых иностранных работ) напрасно было бы искать имена людей, стоявших у истоков ультразвуки...

Перечислим некоторые успешные современные технологические применения ультразвука. Облучение ультразвуком расплавленных металлов и сплавов позволяет получить более однородную мелкокристаллическую их структуру. Это видно хотя бы из приводимого рисунка, взятого из упомянутой книги «Применение ультразвука в промышленности» (существуют подобные же фотографии, полученные еще С. Я. Соколовым, но, разумеется, новые данные всегда более убедительны). Облучение ультразвуком расплавленных металлов содействует удалению из них газов, что в конечном итоге также улучшает качество металла, обеспечивает отсутствие в нем усадочных раковин. На симпозиуме по ультразвуку в Дюссельдорфе в 1973 году ученые ФРГ сообщили, что ими разработана методика формирования требуемой структуры металла при воздействии ультразвука.

Ультразвук используется также при закалке и отпуске сплавов, сварке и пайке, значительны перспективы применения ультразвука при сверлении и долбежке твердых материалов, очистке металлических изделий, для предотвращения образования накипи на стенках котлов и иных сосудов, получения однородных горючих смесей, при газоочистке и сушке различных материалов. В США освоен дешевый метод нарезания резьбы произвольного профиля на металлических изделиях с помощью ультразвука.

О масштабах технологического применения ультразвука говорит то обстоятельство, что в США ультра-

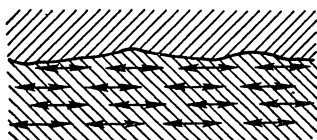
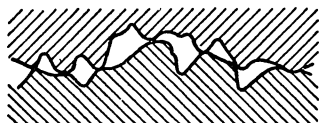


Влияние ультразвука на структуру чугуна. Слева — образец, не подвергавшийся действию ультразвука; справа — образец, обработанный ультразвуком во время кристаллизации.

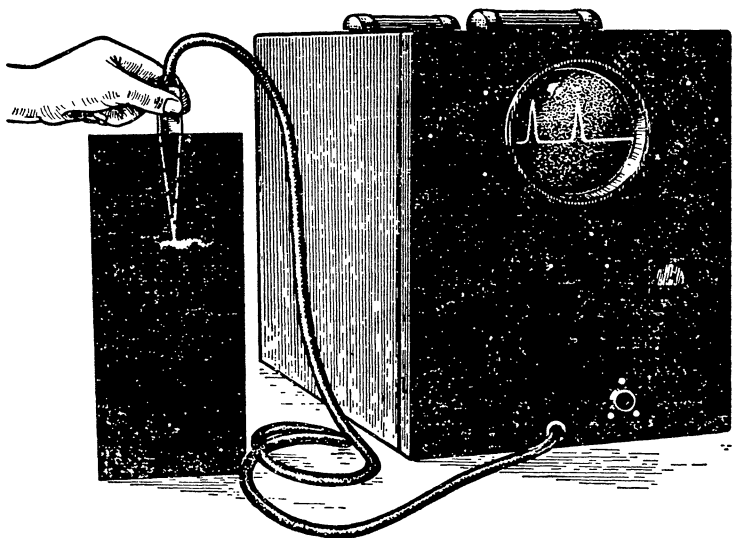
звуковое оборудование изготовляют более 50 фирм. Мощность ультразвуковых установок достигает 10 киловатт и более. Разнообразное ультразвуковое оборудование для различных технологических процессов изготавливается и в нашей стране.

Польские инженеры разработали метод осаждения густого тумана с помощью мощной направленной ультразвуковой сирены. Будучи установлена на носу судна, такая сирена способна улучшить видимость в направлении движения на несколько сот метров.

Другая важная сфера применения ультразвука — автоматический неразрушающий контроль. На судах широко применяются ультразвуковые уровнемеры и расходомеры различных жидкостей в трубах и сосудах.



Ультразвуковая сварка под давлением. Микроструктурный анализ показывает, что стык шероховатых поверхностей (рисунок слева) уже через 0,1 секунды после воздействия ультразвука (горизонтальные стрелки) приобретает гладкую структуру.



Один из первых ультразвуковых дефектоскопов С. Я. Соколова.

На ежегодном симпозиуме по ультразвуку, происходившем в 1974 году в г. Милуоки (США), американские специалисты сообщили о разработке высокотемпературных ультразвуковых преобразователей для контроля узлов жидкометаллических атомных реакторов. Эти преобразователи могут применяться как в стационарных, так и в судовых ядерных энергетических установках.

Ультразвуковая дефектоскопия металлических листов и различных изделий являет собой пример традиционного и достаточно давнего промышленного применения ультразвука. Еще в 1942 и 1953 годах С. Я. Соколову и группе его сотрудников были присуждены Государственные премии СССР за разработку и внедрение ультразвуковых дефектоскопов. С тех пор методы и аппаратура ультразвуковой дефектоскопии значительно усовершенствовались. Современные дефектоскопы позволяют выполнять контроль однородных материалов на глубину от 0,5 миллиметра до 5 метров, при этом в металле обнаруживаются внутренние раковины, трещины и расслоения размером в доли миллиметра. Для выявления столь малых дефектов используется ультразвук частотой до нескольких мегагерц.

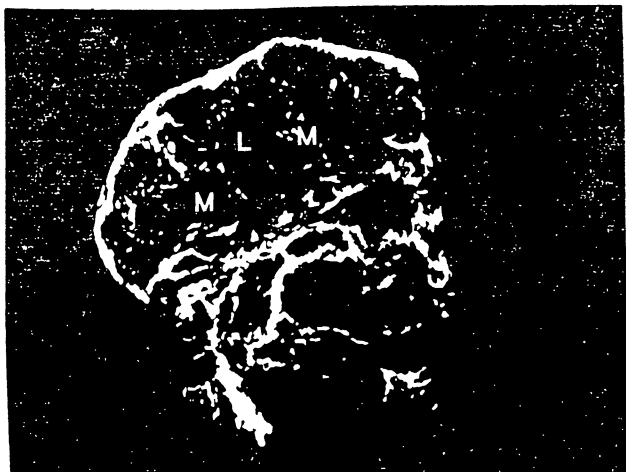
Весьма интересные и глубокие теоретические исследования в области ультразвуковой дефектоскопии были выполнены Л. Г. Меркуловым, А. В. Харитоновым и другими.

Существует несколько методов производственной ультразвуковой дефектоскопии. В наиболее простом (и первом по времени возникновения) — теневом методе, или методе сквозного прозвучивания, излучатель и приемник ультразвука размещаются один против другого по разным сторонам изделия. Наличие дефекта на пути ультразвуковой волны проявляется прежде всего в ослаблении принимаемого сигнала. Синхронное движение вдоль поверхности изделия излучателя и приемника позволяет обследовать всю площадь испытываемого изделия.

Более совершенный импульсный эхометод в принципе мало отличается от метода морского эхолотирования. Излучатель на поверхности изделия периодически посылает ультразвуковые импульсы и принимает сигналы, отраженные от дефектов или неоднородностей внутри изделия. Время между посылкой и приемом импульсов позволяет по известной скорости ультразвука определить глубину залегания дефекта. Существуют и некоторые другие, более сложные методы выявления неоднородностей в изделиях, применяемые прежде всего при исследовательских работах.

В настоящее время в СССР разработано значительное количество совершенных ультразвуковых дефектоскопов. Детали больших машин, судовые валы и другие изделия подвергаются весьма тщательному ультразвуковому контролю.

Нельзя не упомянуть о применении ультразвука в медицине. Оставляя в стороне вопросы ультразвуковой терапии, мы не можем не остановиться на ультразвуковых методах диагностики, связанных, по существу, все с той же «ультразвуковой дефектоскопией», «неразрушающим контролем», но уже не металлов и изделий, а самого человека (именно поэтому мы и взяли эти термины в кавычки). На основе новых систем электронно-акустических преобразователей созданы весьма совершенные визуализаторы внутренних органов человека. Так как разные ткани обладают различными акустическими свойствами, то по картине отраженных или прошедших звуковых волн можно судить о состоянии исследуемой части тела. Отчетливо



Ультразвуковое изображение печени с патологическими изменениями (М — метастаз).

фиксируются нарушения положения и формы внутренних органов, опухолевые процессы и иные отклонения от нормы.

Начиная с 1974 года проводятся ежегодные конгрессы по ультразвуковой медицине. Поражает изобретательность, с которой медики при помощи инженеров находят все новые и новые применения ультразвуку. Здесь и определение содержания липоидов в тканях с помощью оценки ультразвукового рассеяния от них, и применение фокусированного ультразвука для раздражения нервных структур и для измерения скорости потока крови, и даже непрерывное обеспечение контроля за продвижением плода при родах (что очень заинтересовало акушеров).

Обнаружены интересные физические зависимости. Установлено, например, что поглощение ультразвука в легком гораздо больше, чем в других мягких тканях, а поглощение ультразвука в костях неожиданно слабо зависит от его частоты. Разработан метод математического моделирования тканей с помощью ультразвуковых сигналов. Согласно этому методу измеряется величина ослабления звукового сигнала, прошедшего через ткань, а также изменение фазы сигнала в зависимости от частоты ультразвука. Выполняя Фурье-пре-

образования с измеренными сигналами, определяют частотный отклик ткани и с помощью ЭВМ вычерчивают электронный аналог модели ткани.

Венцом ультразвуковой медицинской визуализации можно считать приведенную в книге Г. Чедда картину расположения пяти близнецов в утробе матери. Едва ли какой-нибудь врач решился бы применить для получения подобного изображения рентгеновские лучи. Ультразвуковое же облучение (в определенных дозах) абсолютно безвредно.

Применение комплексной диагностической системы, состоящей из ультразвукового визуализатора, кардиографа и автоматического фоноскопа, анализирующего звуки сердечных сокращений, позволяет в наилучшей степени установить вид того или иного сердечного заболевания.

Характерная для современной электроники миниатюризация и микроминиатюризация ее элементов дает возможность получать сравнительно небольшие по размерам и даже переносные ультразвуковые системы медицинской диагностики, что позволяет применять их не только в специализированных клиниках и стационарах, но даже, например, на судах.

Автор обещал читателю не касаться ультразвуковой терапии, но невозможно не упомянуть о некоторых свежих и смелых идеях, выдвинутых в последнее время отечественными и иностранными учеными. Например, установлено, что ультразвук может использоваться как средство усиления действия гамма-облучения на злокачественные опухоли. Обнаружено также, что при ультразвуковом облучении повышается чувствительность живой клетки к воздействию химических веществ. Это открывает путь к созданию новых, более безвредных вакцин, ибо при их изготовлении можно будет использовать химические реактивы значительно меньшей концентрации. Уже появился новый метод лечения — фонофорез, когда на кожный покров или слизистую оболочку наносится жидкое лекарство или мазь и затем эта поверхность обрабатывается ультразвуком.

Победное шествие ультразвука в промышленности, химии, медицине и других областях человеческой деятельности продолжается.

КОМУ МОГЛА БЫ ПОНАДОБИТЬСЯ «АКУСТИЧЕСКАЯ ГОЛОВА»! РАСЦВЕТ ЭЛЕКТРОАКУСТИКИ

— Почему ты в этот вуз поступаешь?

— Потому, что там самая лучшая дискотека.

Из подслушанного диалога абитуриентов

Электроакустика — этот союз (или, может, точнее, симбиоз) акустики и электроники, кого, кажется, он может удивить сегодня, хотя бы даже с его многодиапазонными радиолами, стереоэлектрофонами, кассетными «магами», сложными тюнерами? Полагаем, с некоторой степенью условности начало электроакустики можно было бы отнести ко времени изобретения Г. Беллом телефонной связи. Условно потому, что трудно назвать электроникой в современном ее представлении обычный электрический ток в проводах телефонной линии.

Настоящее начало электроники было связано с открытием А. С. Поповым радио, созданием в различных странах электронных ламп, используемых в установках для генерации, усиления, выпрямления, модуляции электрических колебаний. Массовые радиовещание и радиоприем вышли тогда на широкую дорогу. От первых любительских детекторных приемников Шапошникова с умильной катушкой самоиндукции размером с небольшой бочонок, от одноламповых регенеративных приемников (как те, так и другие приемники делал у нас в конце 20-х годов, наверное, каждый второй-третий школьник) к отечественным многоламповым «суперам», от слабых местных радиостанций к станциям во многие тысячи киловатт.

...На стене плоский черный конус громкоговорителя «Рекорд», подключенного к домовой трансляционной сети. Взоры всех с трепетом обращены к нему — идет передача «От Советского информбюро». Много тяжкого, а затем и радостного было услышано из этих старинных репродукторов в годы Великой Отечественной.

Замена в последующее время электронных ламп полупроводниками привела к миниатюризации радиоприемных устройств. Каждый человек мог теперь стать

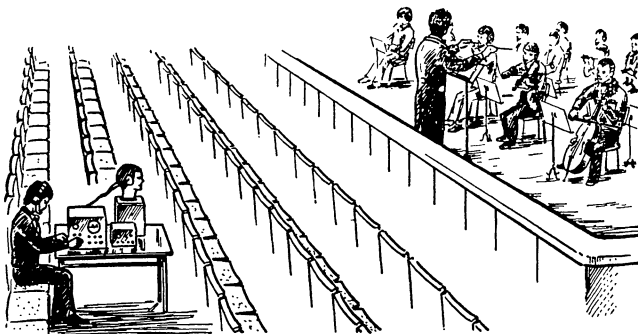
«радионосцем» — повесь свой транзистор на шею, на плечо или даже на кисть руки, ходи и слушай.

А стационарные приемники? Все уже привыкли к тому, что они воспроизводят частотную область звучания самых широкодиапазонных инструментов — органа и рояля. Но не хочется ли вам заполучить на дом говорящую картину? Вот она на стене, изображен какой-то мифологический сюжет, толпы народа, оркестранты. Хозяин дома незаметно нажал кнопку и — звучит роговая музыка. Потом она сменяется симфонической или речью людей. Оказывается, картина наклеена на деревянную деку — излучатель, колебания которого возбуждаются прикрепленной с задней стороны головкой громкоговорителя. Качество звучания, возможно, хуже, чем в настольном приемнике, но определенный эффект достигнут — ваш гость заинтересован.

Значительные работы по электроакустике, акустике концертных залов были в течение ряда лет выполнены советскими учеными Б. Г. Белкиным, В. К. Иофе, А. Н. Качеровичем, А. В. Римским-Корсаковым, М. А. Сапожковым, В. В. Фурдуевым и другими.

Куда идти дальше? Даешь объемное звучание, прежде всего, оркестра! Стереофония — вот новое слово в электроакустике, это — вещь, это — престижно! Два микрофона устанавливаются в различных местах перед оркестром, через два канала производится запись на магнитофонную ленту, на пластинки и т. п. И воспроизводится запись, как известно, через два динамика, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Эффект объемного звучания оркестра достигнут.

Более того, заявила о себе так называемая квадрофоническая система. При воспроизведении устанавливалось уже четыре репродуктора — нечто напоминающее циркораму в кино. Автору в числе нескольких любезно приглашенных слушателей довелось принять участие в демонстрации опытной квадрофонической установки. Рев четырех мощных динамиков, сфокусированных из углов на середину помещения, где располагались слушатели, быстро утомлял, о художественном впечатлении трудно было думать. Чуть вымученными улыбками слушатели приободряли разработчиков аппаратуры. Возможно, поклонников рок-музыки эта система удовлетворила бы в большей мере, но ведь



Запись концертной программы с помощью «акустической головы».

медики достаточно давно установили, что рок-музыка вредна, по существу, она сродни наркотику, в данном случае звуковому. Квадрофония, как, впрочем, и циркорама кино, стала постепенно угасать, не перейдя в широкую аудиторию.

И вот, наконец, на сцену вышла «акустическая голова» (термин официальный), которой, возможно, удастся разрешить споры о способах электроакустической фиксации и воспроизведения звуков музыки и речи. Собственно, выражение «вышла на сцену» фигурально, ибо это — голова-муляж, размещается она не на сцене, а в самом концертном зале, на местах слушателей. Зачем она нужна?

Человек в зале воспринимает музыку двумя ушами, расстояние между которыми по прямой не превышает 30 см. Сама человеческая голова несколько (и привычно для нас) искажает звуковое поле вследствие дифракции на ней, некоторого ее звукопоглощения, экранирования звука, идущего хотя бы чуть-чуть сбоку. Отвечают ли всем этим условиям два размещенных на сцене на значительном расстоянии друг от друга стереофонических микрофонов? Ясно, что нет. Вот поэтому-то микрофоны помещают... внутри ушей упомянутой искусственной головы, приближающейся по своим акустическим свойствам к реальной человеческой голове. Принятые микрофонами внутри головы сигналы поступают в тракт записи. Вся эта система получила название амбиофонической или, просто бифонической. В электронную часть бифонической системы вводится процессорный комплекс, корректирующий те



Последнему варианту самодвижущегося электрофона «Дискобус» не требуется и штепсельной розетки, а лишь ровное место, на котором можно поместить пластинку.

или иные акустические недостатки каждого данного концертного зала — чрезмерное или недостаточное время реверберации, его частотная характеристика и т. д. Число этих корректируемых параметров превышает иногда полудюжину. Новое поколение электроакустической аппаратуры, именуемое в международной практике Hi — Fi (от слов High Fidelity, — высшее качество), будет, вероятно, прежде всего ориентироваться на бифонию.

Совершенствуются и системы воспроизведения звуков. В электрофоны-проигрыватели вводится дистанционное управление уровнем и тембром звучания. Неконтактный адаптер с узким лазерным лучом не вызывает износа пластинок, позволяет уместить на них во много раз большее число записей. «Всечувствующий» лазер дает возможность автоматического повторения любых отдельных частей записи.

В поисках внешней оригинальности (и в то же время конструктивной простоты) разработчики аппаратуры приходят к весьма причудливым решениям. Таков, например, «Дискобус» с микроминиатюризованной электроникой. Он напоминает игрушечный автобус, и движется по пластинке (диску) сам. Нужны лишь стол (или пол), на который кладется пластинка, да штепсельная розетка, от которой тянется шнур к дискобусу. Конечно, от такого устройства трудно ожидать высокока-

качественного звучания, но «зулусские барабаны» и урчание звукового синтезатора рок-музыки качественного звучания и не требуют (впрочем, феномен «электронной эстрады» как явления требует отдельного достаточно внимательного рассмотрения).

Не менее причудливы, хотя иногда небесполезны, электроакустические устройства, все больше вторгающиеся в быт.

ТЕЛЕФОН С ОТОРВАННОЙ ТРУБКОЙ

«Телефон-секретарь не включать весь день».

Из указаний уходящего на работу человека

Телефония охотно и широко использует все возможности электроники. Кнопочные и клавишные аппараты уже теперь составляют значительную конкуренцию аппаратам с наборным диском. Электронные устройства памяти, счета, выбора, фиксации сигналов придают телефонам ряд новых свойств. Можно, например, уходя «наказать» своему телефону позвонить по такому-то номеру и передать нужную информацию, можно фиксировать просьбы или поручения для отсутствующего абонента. В аппаратах ряда фирм при отсутствии вызываемого абонента находящееся в приставке к телефону запоминающее устройство регистрирует номера телефонов, вызывавших абонента, и т. п.

Фирма «Сименс» выпустила телефон для деловых людей. Аппарат значительно облегчает работу тем, кому приходится много звонить. Нажимая соответствующие клавиши, можно запрограммировать сразу десять разговоров — аппарат автоматически соединяет по очереди все заказанные номера. Разумеется, при занятых телефонах аппарат повторяет вызовы несколько раз. Для отечественных служебных телефонов разработаны электронные приставки, автоматически выполняющие несколько различных поручений.

Но вот уже другая и, кажется, совсем необычная ситуация. На столе перед сидящим человеком лежит подобие телефонной трубки. Чуть, может, больше и несколько причудливой формы. Человек берет ее, нажимает на ней несколько клавиш, приближает трубку к уху. Что, он не заметил, что провод у нее оторван? Для этой трубки провода к аппарату и не требуется. Человек перемещается по квартире с нею одной и ведет переговоры с абонентом, находящимся на другом конце города. Чтобы понять, реализована ли здесь какая-то сверхновая идея или это «старинная новинка», следует вернуться назад лет этак на 40—50. Эстрадные да и камерные оперные певцы и в те времена пользовались на сцене микрофонами. Но микрофон на стойке или со свободным проводом стесняет передвижение певца или декламатора по сцене. Родилась мысль о беспроводной связи с звуковоспроизводящей аппаратурой. Появился миниатюрный плоский микрофон (иногда его называли «жилетным», ибо он крепился зажимом, например, к нагрудному карману), к микрофону присоединялся миниатюрный радиопередатчик. За сценой был установлен специальный радиоприемник, связанный с репродуктором в зале.

Неоднократные преобразования акустической и электрической энергии приводили к искажениям, особенно заметным вследствие относительно несовершенной электроакустической техники тех времен. Но для телефонных передач не требуется столь высокого качества звучания, как для музыкальных и вокальных. Старая идея вновь материализовалась в «телефоне с оторванной трубкой». Вы вынимаете из кармана трубку и вызываете нужного вам абонента в городе.

Стали привычными телефонные разговоры абонентов, находящихся в движении, скажем, едущих в автомобиле. В Лондоне, например, действует такая система на 100 000 номеров. У абонентов есть портативный радиоаппарат, который связывает его с автоматической телефонной станцией.

«МАШИНА, ОТВЕТЬ МНЕ ГОЛОСОМ ЧЕЛОВЕЧЬИМ!»

Язык машины, предшествуя искусству и слову, принадлежит только ей одной. Но и самый немой язык может заставить услышать себя, используя огромное количество жестов и знаков.

Ж. Ламетри, 1750 г.

Да, это так, все больше начинают подавать голос (и при том настоящий) неживые объекты. В процессе акустического общения возможны два режима — монолог и диалог. Наиболее прост монолог у неодушевленного объекта. Это, например, говорящий светофор, появившийся впервые на улицах Токио. Записанный заранее на пленку приятный женский голос в зависимости от цвета сигнала светофора произносит две фразы: «Пожалуйста, подождите!» или «Пожалуйста, переходите улицу и будьте осторожны».

Кухонные плиты, сообщающие хозяйке, когда блюдо готово, автомобили, «напоминающие» водителю при захлопывании двери о необходимости пристегнуться, разговорчивые фотокамеры, указывающие при недостаточной освещенности на необходимость воспользоваться вспышкой, при неправильно установленном фокусном расстоянии — проверить расстояние (все эти команды могут производиться на нескольких языках), представляют собой также примеры несложных с акустической точки зрения устройств, состоящих из двух основных элементов: какого-либо реле (светового, теплового, силового, контактного и пр.) и включаемого этим реле звукопроизводящего устройства.

Но вот другой монолог — человек подает команду, скажем, роботу. Здесь дело обстоит уже несколько сложнее. Сложнее, впрочем, не для человека (особенно, разумеется, словоохотливого), а для органа, воспринимающего человеческую речь, автоматически распознающего ее. Хотя во многих странах продолжают интенсивные работы по созданию автоматических систем распознавания звуков речи, нельзя сказать, что все вопросы, связанные с применением подобных совершенных «акустических реле», в полной мере решены.

Какие же признаки речи кладутся в основу подобных устройств? Это прежде всего фонемы (от греческого *phōnēma* — голос) — отдельные звуки речи, способствующие различению значений слов, и форманты — звуковые составляющие, определяющие характер, тембр речи того или иного человека. Они неповторимы (точнее сказать, трудно повторимы и то лишь для отдельных актеров — звукоимитаторов), определяются они формой, объемом, состоянием стенок голосового резонатора. Почему мы по первым словам в телефоне узнаем, что говорит именно Семен Петрович, а не Владимир Иванович? Потому, что у них разные форманты. Японская полиция наряду с дактилотекой имеет фонотеку всех преступников. Сколько бы человек ни старался изменить свой голос, характерные форманты выдадут его.

Если фонемы содействуют автоматическому распознаванию и синтезу речи, то форманты, а также манера речи, различие в быстроте произношения, степень слитности слогов, вариации громкости затрудняют восприятие и синтез речи автоматами. Однако успехи не за горами, и «первые ласточки» в диалогах между живыми и неживыми объектами уже есть. Они облегчают жизнь людям с пороками зрения, слуха, речи. Слепой человек или лежащий больной спрашивает у настенного термометра о температуре в комнате и получает ответ. Такой автомат сравнительно несложен, поскольку число возможных ответов не превышает десятка (трудно допустить, чтобы температура в комнате менялась в больших пределах). Глухой на свой вопрос может получить ответ в виде записки на табло. Создана машина для разговоров между немymi. Участники диалога набирают слова путем нажатия соответствующих клавиш, фразы либо произносятся автоматом вслух, либо высвечиваются на табло.

Японцы, как известно, великие мастера миниатюризации (не искусство ли изготовления лаковых миниатюр приучило их к этому?). Появившиеся здесь ручные часы-магнитофон на жидких кристаллах — шедевр микроминиатюризации: их размер 30×8 мм. Они способны уже сейчас в течение десятков секунд записывать и воспроизводить голос человека. Формально часы предназначены для тех, кому приходится часто «записывать на спичечном коробке» адреса и номера телефонов. Но только ли для этого можно использо-

вать новинку? Известно, что Маяковский сочинял стихи всюду, даже в трамвае он вынимал записную книжку и записывал пришедшую на ум рифму. Куда удобнее сказать несколько слов часам на руке. И, может быть, какой-нибудь будущий Булгаков озаглавит свое произведение (надеемся, столь же талантливое, как у Булгакова прошлого) не «Записками на манжетах», а «Записками на часах»?

Начинается эра диалогов с электронно-счетными машинами. Так, ЭВМ, разработанная одной из американских фирм, способна воспринимать речевые команды (пока лишь до сотни слов). Для распознавания слов используется процессор с производительностью 10 и более миллионов операций в секунду. Вот оно — огромное количество знаков для языка машины, на которое указывал французский философ-материалист Ламетри еще в середине XVIII века.

Японские фирмы разрабатывают ЭВМ пятого поколения. К 1990 году предполагается создать новые ЭВМ, которые будут собирать, обобщать, анализировать и классифицировать информацию подобно человеческому мозгу, синтезировать речь человека в широких пределах.

ОТ ДЫМОВЫХ ФИГУР ДО АКУСТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

Наука начинается с тех пор,
как начинают измерять.

Д. И. Менделеев

Я первым увидел звук.

Надпись на могиле А. Теплера
в Дрездене.

Акустические измерения... Замечание Леонардо да Винчи: «Опыт — основа всякой достоверности» — применимо к ним в полной и, пожалуй, даже особой мере, ибо мало кто в акустике верит одним теоретическим результатам, пусть даже полученным на весьма строгой основе. Видный американский акустик Ф. Морз в предисловии к своей монографии «Колебания и звук» (переведенной в СССР) пишет:

Ни в какой другой области физики основные измерения не представляются столь трудно выполнимыми, как в акустике, тогда как теория относительно проста.

Оставим это утверждение на совести его автора, тем более что оно относится к 1936 году, когда акустическими измерениями занимались в различных странах лишь немногие ученые.

В 1937 году вышла первая в мире книга по акустическим измерениям (автор Л. Л. Мясников). В ней описаны методы измерения звукового давления, акустического сопротивления, даны основы частотного анализа звука по представлениям того времени.

В наши дни область акустических измерений расширилась необычайно, появились новые аспекты, такие, как измерения звукоизоляции, звукопоглощения, виброизоляции, гидроакустические измерения, измерения акустических констант материалов и веществ, корреляционные измерения и т. п. Монографии по отдельным видам акустических измерений сейчас не редкость.

Властно заявляет о себе электронно-вычислительная и управляющая техника. Она позволяет оптимизировать условия измерений, свести к минимуму ошибки. Последние достижения в этой области — автоматическое управление измерениями при нескольких изменяющихся параметрах измеряемого процесса или условиях, в которых происходит этот процесс. Особенно значительные результаты в этой сложной области получены в СССР А. Е. Колесниковым, Д. З. Лопашовым, Е. Л. Осиповым, Б. Д. Тартаковским и другими, в ФРГ — М. Шредером.

Мы остановимся здесь лишь на одном процессе из области акустических измерений — вопросе визуализации звука и вибрации. В какой-то мере мы уже касались его при рассмотрении применения ультразвука в промышленности и медицине.

В 20—30-е годы нашего столетия для визуализации звуковых полей в воздухе применялись так называемые дымовые фигуры. Легкие частички дыма, пыли или пудры при воздействии звукового поля принимают его конфигурацию. Стробоскопическое освещение с частотой звука позволяет зафиксировать картину. Метод не требовал какой-либо сложной аппаратуры. Для гидроакустических полей он, естественно, неприменим.

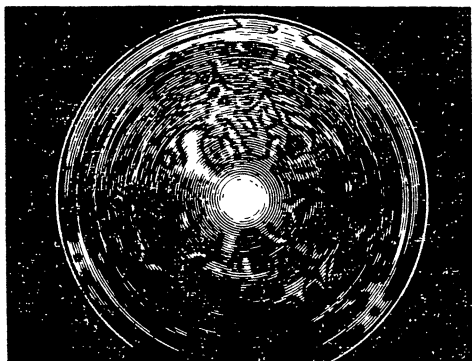
Другой метод — теневой — достаточно старый и вечно новый. Впервые он был предложен Л. Фуко в середине прошлого столетия для исследования однородности оптических сред и качества обработки оптических деталей. Существо его заключается в сле-

дующем. Лучи света от точечного источника проходят через исследуемую среду или изделие, собираются в фокусе и проецируются на экран. В фокусе помещается передвижная заслонка — нож с острой кромкой (он и поныне называется ножом Фуко). При определенном положении нож срезает изображение источника, но благодаря дифракции света экран все же слабо и равномерно освещен. Если на пути лучей света до ножа Фуко окажется оптически неоднородная среда, лучи изменят свой путь и будут либо попадать на нож, либо проходить поверх него. В первом случае на экране появится тень, во втором возникнет более яркое освещение в соответствующем месте экрана. В целом изображение неоднородности появится на экране, окруженное темными и светлыми полосами.

Сгущения и разрежения среды при звуковом процессе связаны с изменением ее плотности, то есть с показателем преломления. Иными словами, это те же оптические неоднородности среды. Преподаватель физики Теплер, возможно даже не зная в точности прибора Фуко, предложил использовать теневой метод для визуализации звуковых полей. Он получил в мировой практике также название шлирен-метода (Schlieren — оптическая неоднородность среды).

Чувствительность метода чрезвычайно высока. Отчетливо фиксируются даже слабые звуковые поля. Если между источником и ножом Фуко поднести руку, будут видны поднимающиеся от нее тепловые потоки (также связанные с изменением показателя преломления среды). На основе теневого метода созданы различные конструкции интерферометров с высокой разрешающей способностью. Если в подобный интерферометр ввести ванну со стенками из оптически однородного стекла, то можно наблюдать звуковые картины в жидкости. Видно, как меняется характер рассеяния звуковых лучей в воде от металлических пластинок — гладкой и ребристой (периодическими препятствиями).

Относительно тонкий слой воды, налитой на колеблющуюся пластину, позволяет весьма просто определять места наиболее интенсивных колебаний пластины на различных частотах. До известной меры можно выявить характер излучения звука в водный слой. На вертикальных же пластинах места интенсивной вибрации обнаруживаются по осыпавшейся с пластин меловой пасте.



Картина колебаний диффузора громкоговорителя, снятая с помощью лазерной визуализационной установки.

В последнее время для визуализации звука и вибрации предложено применять жидкие кристаллы. Хотя холестериновые вещества трудно сравнить с кристаллами, но именно некоторые виды холестериновых соединений обладают свойством менять цвет в зависимости от температуры пленки или пластинки, на которую они нанесены.

При звуковых колебаниях происходят изменения температуры частей колеблющегося тела, тем большие, чем больше амплитуда колебаний. Эти изменения определяют цвет нанесенной на тело жидкокристаллической пленки, и можно видеть цветную картину распределения колебаний на поверхности тела.

В более сложном устройстве для изменения амплитуды звуковых волн (в том числе поверхностных волн Рэлея) в прозрачных пластинах жидкокристаллический слой помещается между двумя подобными пластинами, установленными между скрещенными поляроидами. При отсутствии в пластинах звука на экране за вторым поляроидом нет света, во время колебаний пластин он появляется. Получены формулы для определения интенсивности колебаний пластин по величине прошедшего через поляроиды света.

Появление лазеров дало возможность разработать весьма совершенные установки для визуализации звуковых полей и вибрации. На рисунке приведена полученная И. А. Алдошиной картина колебаний конического диффузора громкоговорителя на частоте

500 герц. Как видно, она достаточно сложна. Анализ подобных картин позволяет разработать звуковоспроизводящие устройства, работающие с минимальными искажениями.

Голография занимает сейчас умы многих исследователей. Основным достоинством ее является возможность получения трехмерных изображений. О сложности проблем в этой области можно судить по материалам книги «Акустическая голография», выпущенной издательством «Судостроение» и суммирующей результаты по акустической голографии. Перспективы ее применения велики в самых разнообразных областях (подводное звуковидение, визуализация предметов в мутных средах, что особенно важно при аварийно-спасательных и водолазных работах). Однако предстоит еще большая работа по повышению качества изображений.

Сцептроника — недавно возникшее направление визуализации и частотного анализа колебаний связано с волоконной оптикой. Пучок из громадного количества тончайших стеклянных волокон возбуждается с торца исследуемыми колебаниями и одновременно подсвечивается ярким источником света. Каждое из волокон имеет свою частоту свободных колебаний, и, если в спектре исследуемого сигнала имеется составляющая этой частоты, конец волокна приходит в интенсивные колебания, что отражается яркой чертой на экране. Возможна очень плотная упаковка волокон (до нескольких тысяч на один квадратный сантиметр), что сулит создание очень малых по размеру, но широкодиапазонных анализаторов — визуализаторов.

Поскольку возможна визуализация звука тем или иным методом, то, естественно, возможна и «фонизация» света. Световые или тепловые сигналы воспринимаются сканирующим устройством и подаются на специальный измерительный магнитофон, обладающий очень широкими частотными и амплитудными характеристиками. При воспроизведении записи через репродуктор отчетливо обнаруживаются на слух места поверхности, наиболее сильно освещенные или нагретые.

«ПЕРЕКРЕСТНЫЕ» КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ. КВАНТОВАЯ АКУСТИКА

«Перекрестными» эффектами Л. Л. Мясников образно назвал эффекты, возникающие при взаимодействии полей или потоков разной природы, например звукового и магнитного, светового и звукового и т. п.

Область перекрестных эффектов поистине безгранична, в настоящее время изучены лишь некоторые «разнополюсные» взаимодействия. Вот, например, как взаимодействует ультразвук с металлом, находящимся в магнитном поле. Вследствие звуковых колебаний материала в магнитном поле в материале создаются вихревые токи, которые, в свою очередь, вызывают появление вторичного электромагнитного поля. По амплитуде этого поля можно, между прочим, судить об интенсивности ультразвука в металле. Эффект обратим: поверхностная радиоволна, направляемая вдоль металлического стержня с постоянным магнитным полем (а при некоторых условиях и без него), создает в стержне ультразвуковые колебания.

Магнитоакустический эффект весьма чувствителен к структурному состоянию металлов и сплавов. Степень проявления эффекта зависит от рода и количества даже весьма малых примесей или добавок в материале. Пользуясь методом магнитно-акустического взаимодействия, можно создать материалы с максимальным или, наоборот, минимальным коэффициентом механических потерь на ультразвуковых частотах.

Предсказанные теоретически С. А. Альтшуллером и исследованные экспериментально У. Х. Копвиллом и другими акустический электронный и ядерный магнитные резонансы обнаружены в настоящее время во множестве кристаллов, содержащих парамагнитные примеси. Эти опыты дают интереснейшие сведения и представления не только о характере магнитоакустических резонансов внутри вещества, но и о динамических свойствах кристаллов на гиперзвуковых частотах 10^9 герц и более.

Звуковые колебания могут менять картину взаимодействия атомных пучков с пьезоэлектрическим материалом. Так, в опытах Л. Л. Мясникова и его сотрудников при облучении кварцевой пластинки атомными пучками калия, рубидия, цезия и таллия наблюдались

дифракционные картины пространственного рассеяния пучков. У той же пластинки, приведенной в колебательное движение на ультразвуковых частотах, дифракционные максимумы рассеяния атомных пучков исчезали.

Еще в 30-е годы нашего столетия был известен акустико-оптический эффект — продукт взаимодействия акустических и световых волн. В жидкости возбуждали систему плоских ультразвуковых волн. В звуковой волне чередуются сгущения и разрежения среды, поэтому подобная структура может действовать как твердая дифракционная решетка. Действительно, при направлении на структуру светового луча появлялись отчетливые дифракционные максимумы и минимумы. Очень эффектные фотографии этих дифракционных картин были получены П. Люка и П. Бикаром во Франции, Ч. Раманом и Н. Натом в Индии, С. Я. Соколовым в СССР. Интенсивность наиболее сильного центрального максимума являлась ярко выраженной функцией амплитуды ультразвуковых волн. Перед второй мировой войной английская фирма «Скофони» разработала на этом принципе модулятор света и применяла его в телевизионных установках с большим экраном и высокой четкостью изображения.

В настоящее время акустические устройства широко применяются для решения различных задач обработки акустической и радиоинформации: гармонического спектрального анализа, голографической записи сигналов, их корреляционной и статистической обработки.

А теперь об одной области, которой, несомненно, принадлежит большое будущее. Кратко эту область можно назвать так: лазеры и акустика. Г. А. Аскарьяном и другими в 1963 году было сообщено в печати о генерации звука при поглощении лазерного излучения в жидкости. Приблизительно в это же время подобное явление наблюдал Л. М. Лямшев. Некоторые исследователи называли это направление «разнополюсных» взаимодействий оптоакустикой.

Механизмы термооптического возбуждения звука многообразны. Звук может возникать вследствие поглощения интенсивного света в среде. Этот механизм связан с релаксационными процессами, изучение которых является предметом молекулярной акустики. Звук можно возбудить путем резкого изменения агрегатного состояния среды (испарение, ионизация)

вследствие электрострикционного эффекта, оптического пробоя.

Американец Ларсон, исследовавший возбуждение звука в твердых телах при воздействии модулированного лазерного излучения, установил, что это излучение генерирует в среде сильный звук в направлении, перпендикулярном направлению распространения луча лазера.

Дальнейшие исследования, произведенные в нашей стране рядом ученых (А. И. Божков, Ф. В. Бункин, С. Г. Касоев, Л. М. Лямшев, К. А. Наугольных и другие), показали, в частности, что можно формировать любую требуемую характеристику направленности излучения звука в жидкость, что, несмотря на относительно малый КПД термооптического возбудителя звука, он может быть достаточно эффективным средством возбуждения. Такой возбудитель удобен при ультразвуковой дефектоскопии металлических листов и деталей с шероховатой поверхностью, затрудняющих установку на нее контактных возбудителей ультразвука.

Разными учеными исследовались случаи излучения звука при воздействии на вещество мощных тепловых полей, импульсного электрического напряжения и т. п.

По мере повышения частоты, то есть уменьшения длины волны ультразвуческих колебаний, звуковые волны начинают «замечать» дискретную структуру твердых тел — кристаллическую ионную решетку. Здесь целесообразно вспомнить корпускулярные представления. Известный физик Уильям Брэгг иронически заметил по этому поводу, что каждый физик вынужден считать свет состоящим по понедельникам, средам и пятницам из частиц, а в остальные дни недели — из волн. А вот что пишет по этому поводу в своей замечательной научно-популярной книге «Глаз и солнце» академик С. И. Вавилов *:

Материя, т. е. вещество и свет, одновременно обладает свойствами волн и частиц, но в целом это не волны и не частицы, и не смесь того и другого (курсив С. И. Вавилова — И. К.). Наши механические понятия не в состоянии полностью охватить реальность, для этого не хватает наглядных образов.

С тех пор последовало много работ, подтверждающих эквивалентность волновой и квантовой механики.

* Вавилов С. И. Глаз и солнце. 9-е изд. М.: Наука, 1976, с. 42.

Звуковой волне соответствует частица, которая была названа фооном — квантом звука. Разумеется, полной аналогии здесь нет. Частицы света — фотоны — элементарны, то есть не состоят из других частиц. Они единообразны, как единообразны электромагнитные поля. Они устойчивы. Параметры фоонов не имеют той устойчивости, которая свойственна параметрам элементарных частиц. В процессе распространения звука меняется характер упругих колебаний, волна из поперечной может переходить в продольную, поверхностную и т. п. Эти процессы надо рассматривать как превращения фоонов в другие их виды, то есть следует предположить многообразие фоонов.

Несмотря на отсутствие данных о параметрах фоонов для различных видов упругих колебаний, введение квантовых представлений в акустику уже принесло свои плоды. Примером служит создание акустического мазера, подобного электромагнитному мазеру или лазеру.

Другой пример — квантовый усилитель ультразвука. Как ни странно, но прямого усилителя звука пока не существует. Для того чтобы усилить звук, нужно сначала превратить его в электрические колебания (с помощью микрофона, гидрофона, виброметра), а затем, после усиления этих колебаний в электронном усилителе, произвести обратное превращение уже усиленных электрических сигналов в звук посредством соответствующих электроакустических преобразователей.

— Позвольте, а резонатор? — спросит читатель.

В полости резонатора звуковое давление увеличивается. Но в резонаторе нет какого-либо постоянного постороннего источника звуковой энергии, усиливающей колебательный процесс подобно тому, как это происходит в электронном усилителе благодаря наличию постоянного электрического источника питания.

Принцип действия фоон-электронного усилителя ультразвуковых колебаний заключается в следующем. В образце пьезоэлектрического полупроводника (например, в кристалле сернистого кадмия) возбуждается звуковая волна высокой частоты. Одновременно кристалл облучается светом, вследствие чего в нем возникают свободные электроны. Эти дрейфующие электроны увлекаются приложенным к кристаллу постоянным электрическим полем. Так как скорость

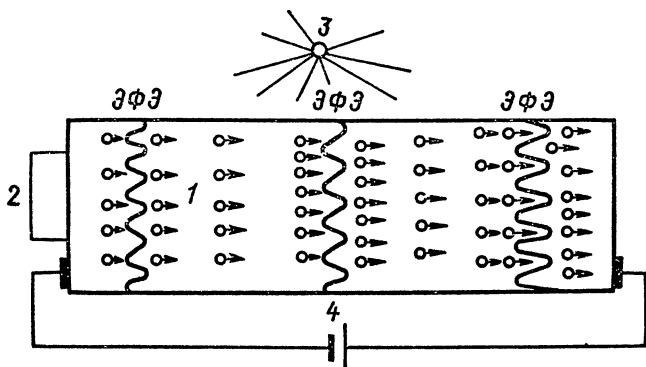


Схема и принцип действия фонон-электронного усилителя высокочастотного звука.

1 — пьезополупроводник; 2 — источник звука; 3 — источник света; 4 — источник постоянного электрического напряжения. По мере движения звуковой волны ее амплитуда увеличивается вследствие взаимодействия между электронами Э и фонами Ф.

электронов больше скорости звука, то электроны как бы тянут за собой звуковые частицы — фононы. Это создает дополнительные механические усилия, и, следовательно, звуковая волна по мере распространения по кристаллу будет усиливаться. Уже созданы образцы квантовых усилителей ультразвука, в которых на расстоянии 10—15 миллиметров удастся получить усиление бегущего ультразвукового импульса в сотни раз. Но при непрерывном излучении звука концентрация энергии в относительно малом объеме полупроводника становится настолько велика, что возникает достаточно сложная задача ее охлаждения во избежание падения коэффициента усиления.

Кайимура Койи исследовал явление фононного эха в диэлектриках, сегнетоэлектриках, некоторых металлах. Механизм возникновения при эксперименте фононного эха в пьезополупроводниках объяснен возбуждением электронов с приповерхностных ловушек материала.

Многочисленные проблемы квантовой акустики регулярно обсуждаются на специальных международных симпозиумах и конференциях. В 1974 году И. А. Викторову, Ю. В. Гуляеву, В. Л. Гуревичу, В. И. Пустовойту была присуждена Государственная премия СССР за цикл исследований по созданию теоретических

основ акустоэлектроники. Фундаментальные, полные интересных идей работы по акустоэлектронике были выполнены академиком Р. В. Хохловым с сотрудниками, а также В. А. Красильниковым и другими советскими учеными.

«Разнополярные» эффекты и взаимодействия — электрон-фононные, фотон-фононные, термофононные, фонон-фононные процессы — манящая и увлекательная область физической (а в недалеком будущем, несомненно, и технической) акустики.

Пипин, король Италии, VIII век:
— Что такое уши?
Флакк Альбин, наставник короля:
— Собиратели звуков.



ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

МИЛЛИОНЫ УКЛАДЫВАЮТСЯ В ДЕСЯТКИ

...Слуховой орган превраща-
ется в руках Гельмгольца в
тонкий физический инстру-
мент...

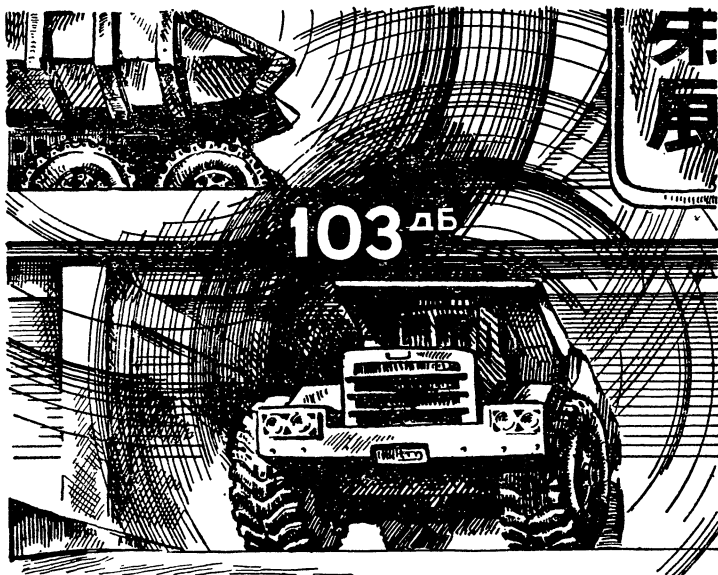
И. М. Сеченов

Для начала — две колонки равенств, по-видимому,
не совсем обычных:

$30 + 30 = 33$	$30 + 20 \approx 30$	
$70 + 70 = 73$	$70 + 60 \approx 70$	(?)
$100 + 100 = 103$	$100 + 90 \approx 100$	

Относящийся к этим колонкам вопрос к читателю по-
хож на вопросы из психологических практикумов,
публикуемых на страницах журналов: что означают
эти равенства и каковы закономерности, характерные
для каждой из колонок?

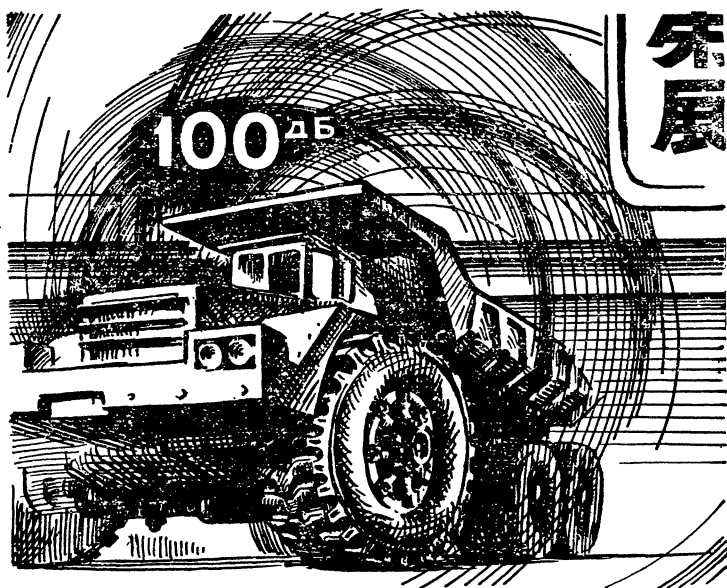
Не будем далее интриговать читателя или отсылать
его, как иногда делается, к ответам, написанным в пе-
ревернутом виде либо помещенным где-то через
десятки страниц. Скажем сразу, что равенства отра-
жают некоторые зависимости условной «алгебры деци-
бел» — логарифмических единиц, принятых для рас-
чета и измерения уровней звука (или вибрации). В наз-
вании «децибел» увековечено имя изобретателя теле-
фона Грэхема Белла. Один децибел соответствует едва
заметному на слух приросту громкости звука. Термин
«уровень» указывает, что берется логарифмическая
единица.



Уличный шумомер в Токио: «И как только допускают на улицы такие чудовищные источники шума...»

Но почему децибелы сродни логарифмическому исчислению? В первую очередь потому, что отражают мудрую особенность слухового (и не только слухового) восприятия живых существ: прирост ощущения приблизительно пропорционален логарифму раздражения. Человечество не случайно приняло «на вооружение» в науке и технике логарифмические масштабы: они позволили упростить графическое изображение колебательных процессов. Об этом еще будет сказано в дальнейшем.

Однако не пора ли вернуться к цифровым колонкам, с которых мы начали разговор? Левая колонка равенств отображает (повторяем, условно), результаты суммирования эффекта действия двух одинаковых источников шума или вибрации, колебательная мощность которых выражена в децибелах над некоторым нулевым порогом. Как видно, вне зависимости от величины колебательного уровня каждого из одинаковых источников, суммарный звуковой уровень двух источников всегда на 3 децибела превышает уровень любого из отдельно взятых источников.



Он же через минуту: «Сколько лет уже работаю на улицах, а все не могу привыкнуть к правилам сложения шумов: одна из громыхалок уехала, а шум, вроде бы, изменился мало!?».

А вторая колонка? Она относится к сложению эффектов двух источников с заметно различающимися колебательными мощностями. Видно, что если уровень более слабого источника на 10 (или более) децибел отличается от уровня более мощного источника, то суммарный уровень практически равен уровню отдельно взятого более мощного источника.

Своеобразие децибельного исчисления неоспоримо, в чем убеждает и беседа в кабинете главного инженера крупного машиностроительного предприятия, свидетелем и невольным участником которой автору довелось быть. Работники акустической лаборатории завода доложили, что им удалось по требованию заказчика снизить шум одной из выпускаемых машин со 100 до 70 децибел. Они ожидали одобрения, но главный инженер, до этого момента не имевший, видимо, времени или желания ознакомиться детально с акустикой, сухо заметил:

— Рано радуетесь. Подумаешь, снизили шум на 30 процентов. Надо до нуля доводить энергию звука.— Он оглянулся на гостя, ища поддержки. Пришлось несколько охладить его:

— Снижение звукового уровня на 30 децибел соответствует уменьшению звуковой энергии не на 30, а на 99,9 процента. А если, наоборот, увеличить уровень шума с 70 до 100 децибел, то это будет соответствовать увеличению звуковой энергии в 1000 раз, то есть круглым счетом на 100 000 процентов. Все это — особенности логарифмического масштаба, характерного для физиологической акустики.

— А еще какие особенности или преимущества у логарифмической шкалы звуковых энергий? — спросил главный инженер.

— Она позволяет большой диапазон значений энергий и интенсивностей звука уместить в маленьком графике.

— А если бы воспользовались линейной шкалой, какой длины она была бы?

— Смотря какой диапазон энергий нас интересует. Может, шкала протянется отсюда до Невского, а может, для этого графика не хватило бы упомянутого Гоголем колдовского стола длиной от Конотопа до Батурина.

— Вот как? А тут, я вижу, мои деятели и частоту отложили в логарифмическом масштабе. Это почему?

— Потому, что равным ощущениям приращения высоты тона соответствует увеличение частоты не на какое-то количество герц, а в какое-то число раз. Например, для увеличения высоты тона 100 герц вдвое требуется повысить его до 200 герц, то есть на 100 герц, а для увеличения вдвое высоты тона 1000 герц требуется увеличить его частоту уже на 1000 герц. А это и есть логарифмический закон.

— И для частот линейная шкала тоже протянется так далеко?

— Нет, тут она будет заметно короче. Если ограничиться диапазоном слышимых частот и откладывать по шкале каждый герц через миллиметр, то длина линейной шкалы уж никак не превысит 20 метров.

— Также многовато, — усмехнулся главный инженер. — Да, акустика — серьезная вещь, — продолжал он задумчиво.

Я ожидал, что он закончит свое резюме словами вроде — Надо будет учесть это в дальнейшем. Но он повернулся к своим сотрудникам и сказал твердо:

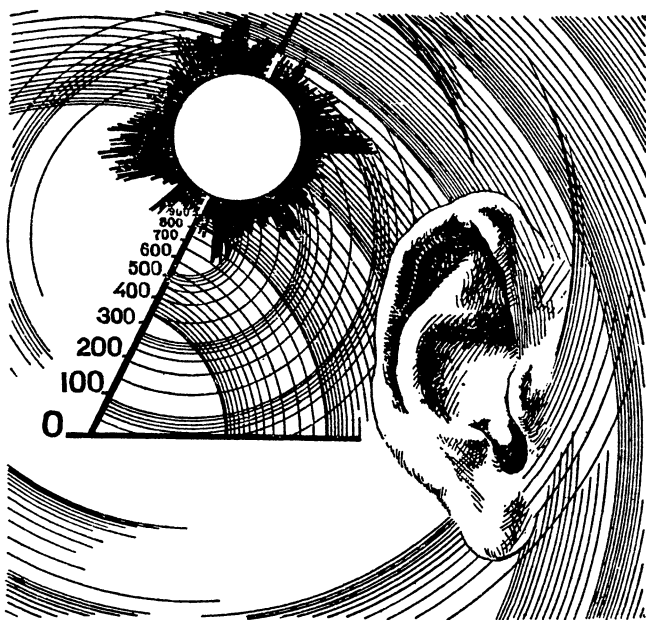
— Вы это учитель!

Один из них, не растерявшись, заметил как-то между прочим:

— Мы это давно учли...

— Вас понял. И для начала сам учту это, полагаю, в желаемом вами смысле. Думаю, что против увеличения каждому квартальной премии на 30 рублей — по рублю за децибел — возражать никто не будет? Уж рубли-то в логарифмическом масштабе, как звуковую энергию, извините, не могу исчислять. А вот для словесного выражения благодарности гостю за интересную беседу логарифмический масштаб подойдет.

Выйдя после беседы на улицу, автор подумал о том, что неплохо было бы точно рассчитать длину линейной шкалы слышимого диапазона сил звуков. Почему-то никто не удосужился сделать это. Конечно, здесь все зависит от того, какой масштаб принять за основу. Один децибел, то есть едва уловимая на слух громкость, соответствует приросту звуковой энергии при-



Линейная шкала сил звуков, воспринимаемых человеческим ухом, протянулась бы от Солнца и далее.

мерно на 25 процентов ее исходной величины. Логично за единицу линейной шкалы принять разность энергий (точнее, интенсивностей ее, то есть потоков энергии в единицу времени на единицу площади), соответствующую одному децибелу на пороге слышимости. Эта разность будет равна $1,25J_0 - J_0$, где J_0 — пороговая интенсивность звука.

На другом, «верхнем» пороге — пороге болевого ощущения — при стандартной частоте 1000 герц интенсивность звука примерно в 10^{14} раз больше, чем на пороге слышимости. Таким образом, диапазон воспринимаемых человеком интенсивностей звука равен $10^{14} J_0 - J_0$.

Число делений линейной шкалы интенсивностей звука будет, следовательно, равно $n = (10^{14} J_0 - J_0) / (1,25 J_0 - J_0) = 4 \cdot 10^{14}$. Если деления линейной шкалы взять равными 1 миллиметру, то протяженность (в километрах) линейной шкалы воспринимаемых ухом ин-

тенсивностей звука составит $4 \times 10^8 = 400$ миллионов километров, то есть больше, чем расстояние от Земли до Солнца. Львиную долю километров вбирает в себя диапазон звуковых уровней 130—140 децибел.

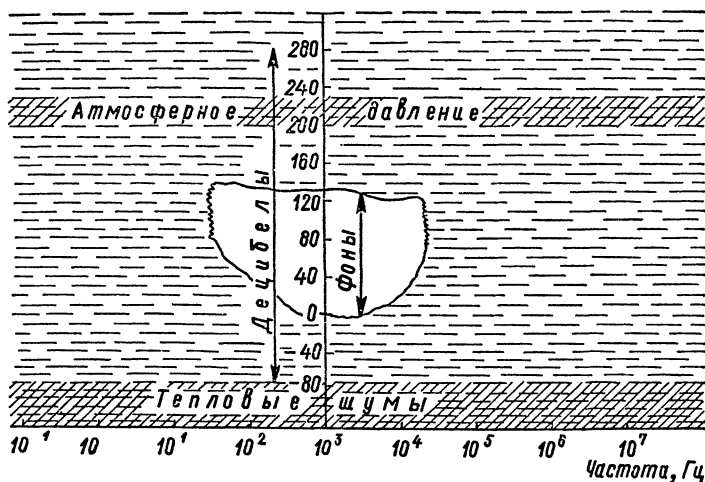
Поразительный все-таки инструмент человеческое ухо, оно стоит того, чтобы продолжить о нем разговор.

ОСТРОВOK СЛЫШИМОСТИ В ОКЕАНЕ НЕВОСПРИНИМАЕМЫХ ЗВУКОВ

Итак, изображение в линейном масштабе диапазона воспринимаемых человеком звуковых энергий потребовало космической шкалы. В действительности же область звуков еще больше. Взгляни, читатель, на этот график — карту «акустического океана». На ней, как и положено на морской карте, нанесена сетка широт и долгот. Акустические широты — это уровни звукового давления, долготы — частоты звуковых колебаний.

Вот он, островок слышимости, именуемый по-научному область слухового восприятия человека. Для животных он может быть расположен в другом месте, чаще всего правее («восточнее») островка человека.

Обследуем берега, границы острова, определим, далеко ли от них могут располагаться какие-нибудь массивы, похожие на географические материки. Нижняя, «южная» граница «острова слышимости», названа порогом слухового восприятия. Ниже всего она опускается в области частот 1—5 килогерц — это частотная область максимальной чувствительности слуха. У некоторых животных она может располагаться еще ниже, но и человека природа одарила достаточно щедро. Тихайший шепот влюбленных, легкий вздох человека, шорох ползущего по стене жука — вот звуки, близкие по интенсивности и приближающиеся к этой границе. Для любителей количественных данных укажем, что амплитуда звуковых колебаний в воздухе на пороге слухового восприятия лишь немногим больше атома водорода. Эта микрокосмика хорошо согласуется с теми по-настоящему космическими цифрами, кото-



Островок слышимости в океане звуков.

рые упоминались в предыдущей главе. От границ слышимости ведется отсчет звуковых уровней вверх в децибелах.

Но вот мы сдвинулись влево или вправо по нижней береговой линии от средней части острова. Эта линия пошла вверх, и, значит, требуются большие звуковые давления, чтобы звуки были восприняты человеком. Неодинаковость слухового восприятия по частоте потребовала введения еще одной единицы — фона. На частоте 1 килогерц значения децибел и фонов приняты одинаковыми, а на других частотах они могут сильно отличаться друг от друга.

Прежде чем покинуть «южный берег» острова, вернемся еще раз на его среднюю, наиболее выдвинутую в море часть. Через специальные приборы можно различить, как вдалеке клубится что-то трудно уловимое. Это — область тепловых шумов среды. Слава природе, что граница нашего острова слышимости достаточно далека от этого материка хаоса, иначе у нас в ушах стоял бы постоянный шум и гул, как у больного тяжелой формой гипертонии.

Теперь направим свои стопы к «северному берегу» острова. Для этого нам понадобится сделать 130—140 шагов-фонов. И вот мы подошли к другой границе невосприимчивости звука, именуемой порогом

болевого ощущения или порогом осязания. Само название указывает причину невосприимчивости на этом участке. Еще в древнекитайской философии Дао-дэ говорилось: «сильные звуки не слышны». Здесь, выше 130—140 фонов, бушуют акустические бури. Звуки настолько сильны, что слуховой аппарат осязает их как боль и через некоторое время может разрушиться.

Да что хрупкое человеческое ухо? При этих звуковых уровнях даже у металла возникает «акустическая усталость». Листы обшивки самолетов в районе выхлопа мощного ракетного двигателя могут разрушиться, если не принять мер предосторожности.

Мореплавателям известны «ревущие сороковые» широты. Здесь, в акустике,— это ревущие сто сороковые. Но как далеко простирается этот все более неистовствующий акустический океан? Еще каких-нибудь 60—70 децибел, и амплитуда звукового давления достигнет статического, атмосферного давления. Такие сверхмощные нелинейные звуки создаются, например, с помощью сильнейших сирен или в системах звуковых концентраторов.

Левая, «восточная» оконечность острова слышимости. Здесь удивительным образом сходятся пороги слышимости и болевого ощущения. Проникнуть на эту оконечность исследователям оказалось не так-то просто. Дальше начинается пока еще достаточно таинственное царство инфразвука, о котором мы поговорим впоследствии.

А здесь сколько долгот (то бишь частот звуковых колебаний) до границ океана? Область слышимости начинается с частот 16—20 герц. До нуля герц, до статики, как будто недалеко. Однако здесь проявляется интересное различие географической и акустической карт. Географические долготы откладываются только в линейном масштабе, акустические же долготы, как и широты, как правило,— в логарифмическом (о причинах этого мы говорили в предыдущей главе). Но нуль логарифмической шкалы лежит в минус бесконечности, и в этом смысле акустический океан в царстве инфразвука также беспределен.

Может быть, более ясно положение на правой оконечности острова, в царстве уже не инфра-, а ультразвука, то есть на частотах более 16—20 килогерц? Здесь человеком достигнуты частоты колебаний не только мега-, но и гигагерц; неизвестно, на каких частотах

инерция молекул или иные факторы положат предел возбуждению звуковых колебаний.

Постоянна ли площадь острова слышимости? Увы, для каждого человека этот остров, как шагреневая кожа, имеет тенденцию «съеживаться» к пожилым годам. Уменьшается он больше всего со стороны высоких частот, — океан неслышимости затапливает его правую часть.

У многих животных и насекомых острова слышимости простираются до более высоких частот. Так, собака может воспринимать не слышимые человеком звуки с частотами 20 и 30 килогерц, летучая мышь, оса, комар — 50 и 60 килогерц.

А крупные животные? Не так-то просто для них всех определить границы слышимости. Вспоминается история, случившаяся лет 20 назад. Промысловики заметили, что киты по подводному шуму обнаруживают китобойные суда и стараются уйти от них. Бюро, проектирующее эти суда, запросило один из научно-исследовательских институтов о чувствительности слуховых органов китов. Что оставалось делать исследователям? Они ответили:

— Если вам удастся поймать живого кита, привезите его к нам для того, чтобы мы могли в гидроакустическом бассейне определить его чувствительность к подводным шумам.

Не стоит жалеть, впрочем, что эта просьба не была удовлетворена промысловиками; более того, теперь принята международная конвенция о запрещении промысла китов.

ЗРЕНИЕ ИЛИ СЛУХ (И РЕЧЬ)?

Я всегда считал, что литература существует, по меньшей мере, столько же для уха, сколько для глаза.

Н. Винер. Я — математик

Что предпочесть в каждом конкретном случае, какой из органов чувств более информативен? Многим этот вопрос покажется праздным или даже схоластическим, но специалисты по инженерной психологии не снимают его с повестки дня.

«Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать» — гласит народная мудрость, и это, казалось бы, дает исчерпывающий ответ. Обратимся, однако, к данным научных исследований. Американский ученый Дж. Милл провел обстоятельные опыты, целью которых было сравнение информативности слуха и зрения при восприятии простых сигналов. В одном из опытов испытуемым предлагалось различать по частоте звуковые тона в диапазоне от 100 до 8000 герц.

Оказалось, если говорить попросту, что при восприятии элементарных сигналов пропускная способность к нюансировке, к восприятию сложных сигналов у глаза значительно больше, чем у уха. Известна также значительно бóльшая пропускная способность зрительного нерва в сравнении со слуховым, бóльшая площадь участка коры головного мозга, обслуживающего зрение, по сравнению с площадью участка, обслуживающего слух, и т. п.

Но как может человек передать, описать ощущение, впечатление от какого-либо воспринятого глазом образа? Глаза сами по себе могут передавать некоторые достаточно сложные движения души, однако для простейшего сообщения о том, что воспринятый его глазом цвет является синим, у человека нет парного глазу органа — передатчика электромагнитных сигналов. Приходится прибегать к излучателю звуковых сигналов — органу речи (или к движению пишущей руки).

«Может быть, эхо умеет передразнивать и зрение, как оно умеет передразнивать голос?» — вопрошает Карлик в сказке О. Уайльда «День рождения инфанты». Увы, нет, прелесть естественного эха в земных условиях доступна только уху; только звук с его относительно малой скоростью распространения дает достаточно длительную реверберацию.

Вот эта-то «парность» органов звукового приема и передачи информации придает им исключительную важность.

Там, где была речь, все совершалось, все познавалось... Поистине не понимают того, кто мыслит мыслью (но не говорит), — писали еще брахманы в древней Индии, этой, по выражению Маркса, «колыбели наших языков».

И не потому ли мудрый Монтень в главе своих «Опытов», названной им «Об искусстве собеседования», высказался так:

— Самое плодотворное и естественное упражнение нашего ума, по-моему, беседа... Вот почему, если бы меня принудили немедленно сделать выбор, я, наверное, предпочел бы скорее потерять зрение, чем слух и речь.

Мудрому достоин вторить лишь также мудрец. Один из великих материалистов древности Гераклит, констатируя, между прочим, что... «глаза — более точные свидетели, чем уши», закончил свое рассуждение словами:

— Я предпочитаю то, что можно увидеть, услышать и изучить. Следует полагать, что техническая психология — наука, которая сейчас еще только начинает развиваться, со временем подтвердит, что вопрос о предпочтительности того или иного органа чувств будет во все большей степени заменяться тезисом об их гармоничной взаимодополняемости.

ЕЩЕ НЕМНОГО О СЛУХЕ

Некоторые из российских поэтов-футуристов в начале века утверждали, что в придуманных ими, в сущности, нелепых словах «дыр», «бул», «щир» больше содержания, чем во всех созданных ранее кем-либо стихотворениях.

Но, быть может, сочетания подобных бессмысленных слогов могут все же послужить если не поэзии, то науке?

Описанное выше относилось главным образом к оценке слуховым аппаратом громкости разнообразных звуков. Но еще в 30-х годах нашего века ученые-акустики Лэйрд и Койе заметили, что ощущение громкости не соответствует утомляющему, травмирующему действию звуков и шумов. Если ощущение громкости достигает максимума где-то в районе от 1 до 3—5 килогерц, то действие звука на нервную систему тем больше, чем выше частота (вплоть до границы ультразвука). Так родились первые «кривые равной неприятности» звуков. Эти кривые монотонно спадают с частотой, то есть чем выше частота звука, тем меньший звуковой уровень требуется для создания равного по силе раздражающего действия на человека. Если же говорить о полном массиве этих кривых в сравнении с изображенным ранее островом слышимости, то можно

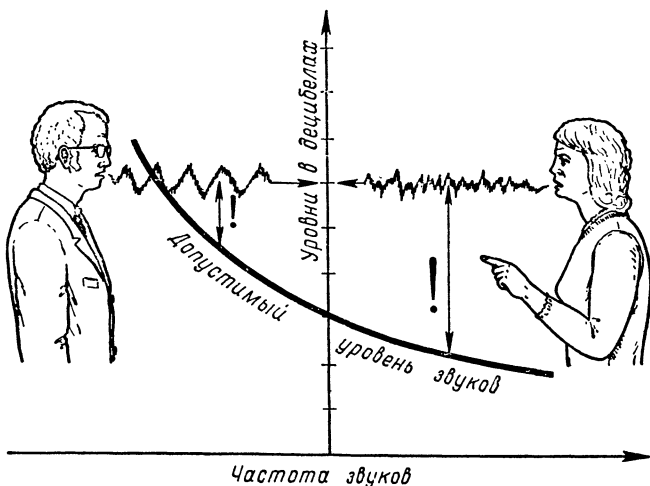
сказать, что «остров неприятности» будет иметь широкий и отчетливо выраженный мыс в юго-западной, то есть правой нижней части.

Эти-то кривые и послужили основой для создания действующих ныне международных нормативов по допустимым звукам различной частоты, силы и продолжительности. Начали появляться различные виды децибел. Известны так называемые децибелы С, обозначаемые как дБ (С) и соответствующие той шкале шумомера, которая равно чувствительна к звукам разных частот. Они применяются при измерении звуков значительной интенсивности. Другие децибелы — дБ (А) в большей мере отвечают восприятию слабых звуков. Но зато они точнее отображают травмирующее действие звуков по отношению к нервной системе человека, поэтому дБ (А) применяются все чаще при оценке вредного действия различных звуков и шумов.

Децибелы (А) допускают большие звуковые уровни при средних и относительно низких частотах и более слабые уровни — при высоких частотах. Шутливый вопрос: звук чьего голоса — мужского или женского — сильнее раздражает? Поскольку форма частотной кривой допустимых уровней в дБ (А) близка к гиперболе, то при равном уровне звука голосов мужчины и женщины разность будет больше у женского голоса, то есть он окажет большее раздражающее действие.

Маскировка звуков. Это также очень интересное явление, связанное со слуховым аппаратом. Если оперировать формулировкой из учебника по акустике, то можно сказать, что маскировкой называется уменьшение способности слушателя воспринимать один звук в присутствии другого. При этом первый звук называется маскируемым, а второй маскирующим. Эффект маскировки может быть отображен повышением порога чувствительности уха по отношению к маскируемому звуку, то есть понижением чувствительности уха на частоте (или частотах) маскируемого звука.

Нельзя сказать, что маскировка звуков — открытие физиологической акустики наших дней. О ней говорилось еще... в древнегреческих мифах. Титан Кронос (Крон), как известно, был склонен к такому странному занятию, как глотание собственных детей. Эта незавидная участь грозила и будущему великому Зевсу. Но находчивая мать Зевса Рея дала Крону проглотить завернутый в пеленки камень, а младенца упрята-



Так как звук мужского голоса обычно более низкочастотный, то он в меньшей мере может превысить допустимый звуковой уровень. Звуки женского голоса с их значительным количеством высокочастотных составляющих способны в большей мере превышать уровень, допускаемый нормативной кривой.

ла в пещеру на Крите. Когда ребенок плакал, то воины, чтобы заглушить его плач, ударяли камнями по своим щитам — маскировка поистине отличная.

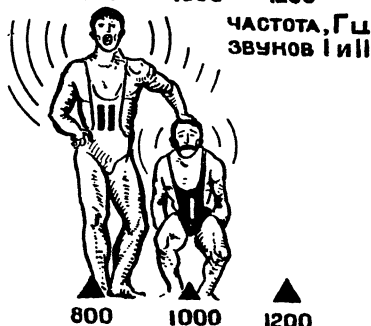
В наше время этому явлению посвящен целый ряд исследований. Изучалась маскировка: чистого тона чистым тоном различной частоты, чистого тона шумом, речи чистыми тонами, речи монотонными шумами, речи импульсными звуками и т. п.

Наиболее отчетливые закономерности получены для случая маскировки чистого тона другими, отдельно взятыми чистыми тонами различной частоты. Как и следует ожидать, наибольший маскирующий эффект будет при совпадении частот маскируемого и маскирующего звуков. Если уровень маскирующего звука в достаточной мере превышает уровень маскируемого, то последний полностью подавляется первым.

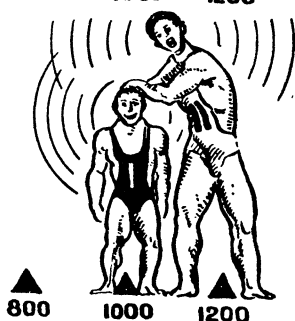
Попробуем теперь сдвинуть частоту маскирующего звука от частоты маскируемого, скажем, вверх на определенный интервал, например на 200—300 герц. Маскирующее действие резко упало, и стал отчетливо прослушиваться первичный тон. А теперь переместим час-



Наибольшим маскирующим действием по отношению к звуку I обладает более мощный звук II той же частоты.



Сравнительно мощный звук II, частота которого несколько ниже частоты звука I, обладает еще достаточно сильным маскирующим действием.



Звук II, частота которого выше частоты маскируемого звука I, обладает сравнительно малым маскирующим действием.

тоту маскирующего тона на такой же интервал, но не выше, а ниже маскируемого. Мы вправе как будто ожидать, что маскируемый тон проявится столь же отчетливо. Но что это? Он слышен теперь значительно слабее, чем тогда, когда действовал маскирующий тон, лежащий на шкале частот выше маскируемого.

Итак, выявляется еще одно интересное свойство слухового аппарата человека, которое едва ли можно было предвидеть: низкочастотные тона обладают большим маскирующим эффектом, чем высокочастотные.

Объяснением этому явлению может служить нелинейность восприятия звуков слуховым аппаратом. Как известно, скажем, из радиотехники, при нелинейной характеристике чувствительности какого-либо аппарата или тракта в нем кроме основного воздействующего тона возникает ряд обертонов, то есть составляющих более высоких частот. Частота одного из этих обертонов может располагаться близко к частоте маскируемого звука или даже совпадать с ней, что и обуславливает значительную маскировку низкочастотными тонами.

А теперь — волнующий корабелов, да и других транспортников вопрос о маскировке речи шумом. Сколько команд, сколько донесений оказались в нужный момент непонятыми из-за шума! Можно себе представить, чем это было или могло быть чревато, особенно в сложных морских условиях.

Для определения разборчивости (или, по-иному, артикуляции) речи в условиях помех (либо при наличии искажений в звуковоспроизводящем акустическом тракте) пользуются артикуляционными таблицами. Заметим, что различают слоговую, словесную и фразовую артикуляцию. Проще всего определять с помощью подопытных лиц слоговую артикуляцию. Разумеется, это происходит в лаборатории, где искусственно воссоздаются акустические условия, отвечающие будущим натурным условиям.

Слоговые артикуляционные испытательные таблицы состоят из 50 слогов, большей частью искусственных и потому распознаваемых с большим трудом, чем известные, привычные слоги. Вот первые два столбца одной из артикуляционных таблиц, входящих в отечественный ГОСТ:

няк	пуль
мюф	зош
фсен	ряй
ек	стял
вох	жоф

Тут впору вспомнить наш эпиграф. Если футуристы считали крупным вкладом в стихотворчество три бессмысленных слога, то входящие в ГОСТ 50 артикуляционных таблиц по 50 слогов каждая — это уже целый «катехизис поэзии»! А между тем артикуляционным таблицам не нашлось лучшего применения, как лежать

на столе диктора, монотонно читающего слоги и следящего за тем, чтобы испытуемые лица не переговаривались и не засыпали.

Число правильно понятых слогов таблицы, усредненное по всем испытуемым, представляет собой процент слоговой артикуляции, с помощью которой по соответствующим кривым можно определить артикуляцию фраз. Так, при слоговой артикуляции 40—50 процентов число правильно понятых фраз достигает 90 процентов (вот роль смыслового фактора!). При слоговой артикуляции 70 процентов процент правильно понятых фраз близок к 100, причем смысл фраз улавливается почти без напряжения.

Можно было бы еще много говорить об удивительном аппарате слухового восприятия, например о том, как благодаря бинауральному эффекту двух ушей определяют со значительной точностью направление на источник звука. Здесь возможны достаточно своеобразные эффекты. Пусть имеются два звуковых источника одинаковой силы. Ослабление уровня одного из источников вызывает иллюзию движения звукового образа в сторону более громкого источника. Я. Ш. Вахитов в своей монографии по электроакустике указывает, что это явление может быть использовано в одном из методов стереофонического воспроизведения звуков.

Так, что же, неужели у уха нет недостатков? Есть, конечно. Упомянем лишь один из них. Он связан с той же громкостью звуков. Диапазон воспринимаемых слуховым аппаратом громкостей, как мы видели, весьма велик. Но вот в области сравнения громкости звуков ухо не столь уж совершенно.

Почти каждый человек может сказать, что такой-то звук вдвое или, скажем, втрое громче другого. Установить на слух пяти, шестикратную разницу в громкости двух однородных звуков могут лишь немногие. При большем различии громкостей субъективно сравниваемых звуков пасуют и эти немногие.

УДИВИТЕЛЬНЫЙ МИР ЗВУКА ПРЕВРАЩАЕТСЯ В УГРОЖАЮЩИЙ МИР ЗВУКА

...Спит, убаюканная ленью
Людской врагини — тишины.

А. Блок

Тишины хочу, тишины.
Нервы, что ли, обожжены?

А. Вознесенский

Который же из поэтов прав в этом заочном споре? Оба. Да, оба, потому что стихотворение Блока относится к времени, когда человек жил среди полей и глухих лесов, вопль же Вознесенского характерен для современного «машинизированного» образа жизни. Впрочем, вредное влияние шума отмечалось еще в древности Ювеналом и Лукрецием Каром.

Раздражают человека производственные и различные бытовые шумы, но, пожалуй, шумовое лидерство в наше время принадлежит транспорту. Проведенное в Каспийском пароходстве медицинское обследование личного состава судов показало, что среди персонала машинных команд около 70 процентов страдают теми или иными нарушениями нервной, сердечно-сосудистой и иных систем. У палубных команд этот процент был гораздо меньше. Не последнюю роль играют такие факторы, как вредные испарения, высокая температура, но субъективные жалобы на шум и вибрацию стояли на первом месте.

Корабли будущего — суда на воздушной подушке. Здесь мощнейшими источниками шума являются вентиляторы, нагнетающие воздух в «юбку» судна, и воздушные винты, приводящие суда в движение. Английский акустик Трилло опубликовал в «Журнале звука и вибрации» шумовые диаграммы судов на воздушной подушке, совершающих регулярные рейсы между городами Портсмут и Райд. Диаграммы имеют вид концентрических кругов с уровнями звука до 90 децибел. Судно тащит с собой эти «круги шумового ада», и жители прибрежных селений задолго узнают о приближении судна. Они подавали в муниципалитет прошения о прекращении курсирования таких судов.

Прибрежные селения. А что же творится на самом судне!? Конечно, меры по звукоизоляции принимаются, но полностью избавиться от шума все же не удастся.

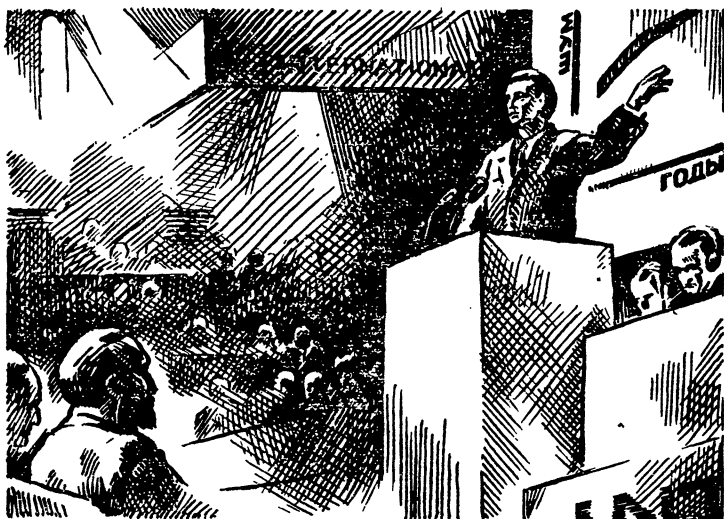
Авиация будущего. Каждый школьник скажет, что



Лукреций Кар (I век н. э.): «Вредного много нам в уши идет».

это — сверхзвуковые самолеты, которые сэкономят человеку миллиарды человеко-часов, ускорят перевозку грузов. Все это, конечно, так, но... Сотрудники ЮНЕСКО попробовали представить, что произойдет, если все пассажирские линии Западной Европы будут обслуживаться сверхзвуковыми самолетами. При переходе звукового барьера у корпуса самолета образуется мощная звуковая волна, конусом расходящаяся в стороны на расстояние в несколько десятков километров. Интенсивность ее настолько велика, что существует даже патент (американский), согласно которому эта волна используется (на близком расстоянии) для разрушения легких зданий.

Масштабы старушки Европы не столь уж громадны, и если сверхзвуковая авиация действительно утвердится повсеместно, то почти в любой точке Европейского континента каждый житель хоть раз в день подвергнется действию звукового удара.



Ф. Ингерслев [президент VI Международного конгресса по акустике, XX век н. э.] «Шум — это яд».

Перспектива, конечно, не из веселых. Но в наши-то дни дело до этого еще не дошло, не так ли? Однако, что за демонстрация движется по улицам Парижа? Впереди люди с широкими муаровыми лентами через плечо. Это — мэры нескольких парижских округов, прилегающих к аэродрому Орли. На транспарантах демонстрантов призывы: «Избавьте нас от шума», «Дайте спать!», «Тишину в школы!»

Разумеется, парижане не одиноки в своих жалобах на авиационные шумы. Например, педагоги ряда школ Лос-Анджелеса заявили, что они принуждены прерывать учебный процесс один раз в две минуты — во время, когда пролетает самолет.

Перенесемся на момент на другой континент. Фешенебельный пляж Копакабана в Рио-де-Жанейро, неоднократно воспетый в книгах, изображенный в кинофильмах. Мимо пляжа проходит городская автотрасса. Когда-то на нем могли слышать... шум моря. А теперь? «Прощай, Копакабана», — читаем в газетной корреспонденции; на смену райскому уголку пришла грохочущая преисподняя. Непрекращающийся рев моторов и автомобильные гудки доводят уровень шума до 85 децибел и более. Один врач на конгрессе в том же Рио-де-Жанейро заявил:

— Если так будет продолжаться — к 2000 году мы все оглохнем.

И все это — только от легковых автомобилей.

...Наш друг автомобиль. Так ласково именуют автомашину в книгах по туристским поездкам. Но если друзей слишком много? Уже сейчас на Садовом кольце в Москве шум в квартирах при открытых окнах (или даже форточках) часто превышает допустимые нормы, хотя здесь движутся лишь легковые автомобили. Что же тогда говорить о машинах грузоподъемностью 10, 20, 30 тонн, автомотрисах с моторами мощностью 300—400 лошадиных сил, автопоездах? Водители этих автомастодонтов и жители селений, через которые они проезжают, находятся под воздействием очень мощных шумов.

Да что машины-мастодонты! Возьмем так называемую малую механизацию. В Ленинграде во многих жилищных хозяйствах применяются небольшие развозные тележки с маленьким, но необычайно трескучим мотором. «Механизация малая, а шум большой», — говорят горожане, когда мимо них проползает это приземистое желто-красное сооружение.

Но довольно о шумах, которые замечают все. Поговорим о безобидных как будто бы «шумиках» (выражение В. Маяковского). Доля интеллектуального труда по мере прогресса человечества непрерывно возрастает, и вот тут-то начинают заявлять о себе «невинные» шумы. Наиболее рельефно это проявляется при творческой работе. Сын Льва Николаевича Толстого Сергей Львович писал в воспоминаниях об отце:

Когда он работал, к нему никто не смел входить, даже моя мать! Ему нужна была полная тишина и уверенность в том, что никто не прервет его занятий. Даже в соседнюю комнату можно было входить только тихо и осторожно.

Гейне не мог работать даже при незначительном шуме. Перед тем как приступить к работе, он закупоривал все окна.

Из письма Чайковского к Н. фон Мекк:

...Никакого шума я буквально переносить не могу; а вчера во Флоренции, и сегодня здесь каждый проезжающий экипаж раздражает меня и приводит в состояние бешенства. Каждый крик, каждый звук раздражает мне нервы (Рим, 19 ноября 1877).

«Гений и злодейство — две вещи несовместные» — мы склонны верить в утверждение поэта, хотя прямых

доказательств этого положения как будто нет. Но что гений и шум несовместимы — тому доказательств множество, и мы привели лишь малую их часть.

Отдых, сон... Может быть, здесь шумы не так важны? Упомянем такой эпизод. Как известно, выдающийся путешественник-полярник Ф. Нансен предпринял попытку достичь Северного полюса с судна «Фрам», затертого льдами. К полюсу пошли пешком двое. У них был большой спальный мешок, чтобы можно было согреть друг друга во время сна. При первой же ночевке Нансен убедился, что его спутник... храпит. Смертельно усталый, Нансен все же не мог спать ни в первую, ни во вторую ночь и потребовал разрезать спальный мешок на два.

А теперь — о домашнем отдыхе горожанина. На одном из международных конгрессов по акустике известный ученый Ван ден Эйк выступил с докладом «Радио моих соседей». Докладчик показывал спектрограммы и уровни звука в обычной квартире при работе громкоговорителя в соседней квартире. Эти данные не явились откровением для собравшихся, но определенный интерес доклад вызвал.

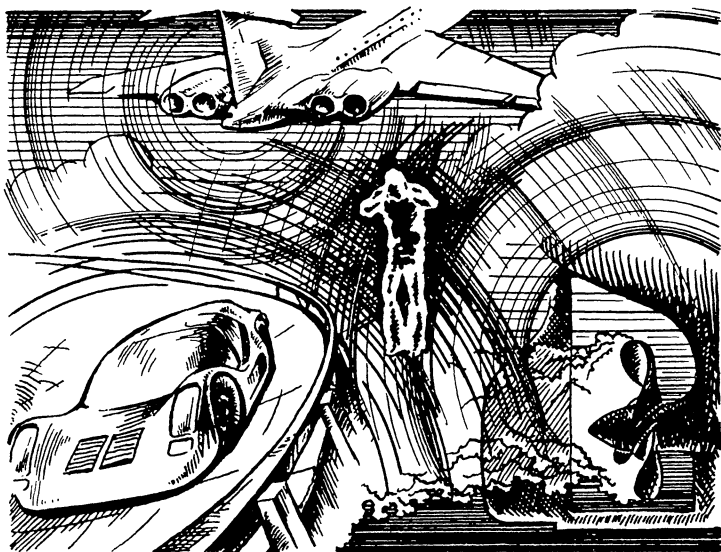
Акустические конгрессы проводятся раз в три года. В программе следующего конгресса фигурировало название очередного доклада того же Ван ден Эйка: «Телевидение моих соседей». Отдельные участники склонны были видеть в подобном повторении своего рода манию, но большинство правильно оценило важность настойчиво поднимаемого докладчиком вопроса о вредности бытовых шумов.

Некоторые полагают, что уровень квартирных шумов в наше время возрос в связи с внедрением стандартных облегченных строительных конструкций. Но вот две выдержки из «акустического» рассказа А. П. Чехова «Дóма».

...Был четвертый час вечера. Наверху, за потолком, во втором этаже кто-то ходил из угла в угол, а еще выше, на третьем этаже, четыре руки играли гаммы. ...За потолком не слышались уже гаммы, но обитатель второго этажа все еще шагал из угла в угол.

А ведь в те времена не было панельного домостроения, при котором звукозащита весьма и весьма относительна.

Как только не именуют шум: «бич нашего времени», «невидимый враг», «шлаки цивилизации». Но, пожалуй, наиболее ярко и сильно характеризовал



«Вполне согласен, что шум — это яд. Но что делать, чтобы спастись от него!!».

шум виднейший датский акустик Ф. Ингерслев одним словом: «яд».

Да простит читатель многократное возвращение к международным конгрессам, но нельзя не вспомнить о большой выставке, проходившей под девизом «Меньше шума!» в Штутгарте. Громадный плакат у входа на выставку гласил: «Когда-нибудь человечество принуждено будет расправляться с шумом так же, как оно расправляется с холерой и чумой». И подпись: Р. Кох. Кох, открывший возбудителя не только туберкулеза, но и холеры, знал, о чем говорит. Время, о котором он упоминал, наступило. «Тишины хочу, тишины!» — этот вопль современного человека звучит громче самых громких шумов.

Итак, разработка мер борьбы с шумом становится первоочередным делом.

«СПАСИТЕ НАШИ УШИ!»

Шум — это отходы цивилизации. Так сведем же эти отходы к минимуму!

Плакат на Всесоюзном совещании по звукоизоляции в Ленинграде, 1974 г.

В заголовке — начало текста телеграммы, которую послали в одно из ведомственных управлений несколько отпускников, совершавших поездку на комфортабельном теплоходе. (У телеграммы была вторая часть: «...а души мы сами спасем», но это уже не имеет отношения к предмету нашего повествования.)

В пору теперь поговорить о том, какие же меры защиты от шума и вибрации применяются в практике. Нельзя сказать, что ранее не пытались бороться с вредными звуками. Но у нас, свидетелей и участников научно-технической революции, те, прежние меры могут лишь вызвать невольную улыбку. Так, в Англии еще в стародавние времена был издан королевский указ, запрещавший бить жен в ночное время. В Древнем Риме выстилали соломой булыжную мостовую перед домом больного патриция. Екатерина II отменила в столице сигналы — механические свистки, устанавливавшиеся в некоторых экипажах. Впрочем, об одной мере по охране окружающей среды от «акустического загрязнения» и сейчас нельзя говорить без уважения. Естествоведы довольно давно установили, что рыба боится пароходных шумов, и в нижнем течении Урала было запрещено пароходное сообщение, чтобы не пугать рыбу ценных пород, идущую на нерест.

Сейчас человечество располагает по крайней мере четырьмя «эшелонами» шумо- и виброзащитных средств. Первый «эшелон» — авангард противозумовой борьбы — воздействие на источник колебаний, уменьшение возмущающих сил, возникающих при работе механизмов, машин, устройств.

Возьмем, к примеру, дизельный двигатель. Интенсивный шум здесь возникает от вспышки в цилиндрах. Ученые ФРГ разработали так называемый М-процесс, при котором сгорание топлива в головке цилиндра растянуто во времени. Мощность двигателя от этого теряется лишь в небольшой степени, а шум становится гораздо слабее. Ясно также, что если, скажем, насос

работает в докавитационном режиме, то шум его будет меньше, чем у кавитирующего насоса. Вообще, воздействуя на характер и параметры рабочего процесса машин и на их конструкцию, можно в ряде случаев заметно снизить их шум и вибрацию. Во Франции появились самосвалы, кузова которых сделаны из толстой прессованной резины. В процессе нагрузки такого самосвала породой, камнями и др., при его движении по неровной дороге и разгрузке шум значительно меньше, чем у самосвала с металлическим кузовом.

Фундаментальная монография по борьбе с шумом и вибрацией машин создана М. Крокером (США). В нашей стране ряд физических задач, связанных с обесшумливанием машин различных назначений, решен М. Д. Генкиным, В. И. Зинченко, Н. И. Ивановым, Э. Л. Мышинским, К. В. Фроловым, Г. А. Хорошевым, Е. Я. Юдиным и другими.

Второй и третий «эшелоны» защиты от вредных шумов и вибрации схожи друг с другом. Их отличает, по существу, лишь их расположение относительно источника шума и вибрации. Средства второго «эшелона» примыкают к источнику. Это разнообразные глушители шума, звукоизолирующие кожухи и капоты вокруг механизмов, виброизоляторы под лапами и рамами механизмов, вибродемпфирующие средства на интенсивно вибрирующих частях механизмов, их рамах, фундаментах.

Порой средства шумозащиты из второго эшелона принимают весьма оригинальный, почти экзотический характер. Например, в Ростовском инженерно-строительном институте для заглушения шума некоторых станков применили слои... мыльной пены, наносимой на излучающие звук поверхности. Исследования, проведенные во Франции, показали, что основной эффект звукозаглушения обуславливается при этом резонансным поглощением звука пузырьками, имеющимися в пене. Только французские акустики применили этот способ для заглушения не станков, а ракетных двигателей. Работники акустической лаборатории Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта разработали ряд разнообразных средств для заглушения шума путевых и строительно-дорожных машин, в результате чего их шумность была снижена в несколько раз.

Третий эшелон шумозащитных средств — это звуко-



Мирная и романтическая некогда профессия мельника. Мелодичное журчание воды, спокойный шорох жерновов... Нынешний мельник, чтобы спасти слух и нервную систему от шума мельничной машины, принужден пользоваться противощумовыми наушниками. Еще одна корректировка романтики техникой.

защитные экраны и выгородки на определенном расстоянии от источника шума, звукоизолирующие ограждения — стены, переборки, полы, виброизолирующие крепления целых помещений («плавающие» каюты на судах).

Стоимость мероприятий по шумо- и виброзащите на судах довольно велика; на советско-шведском симпозиуме по судовой акустике в 1976 году шведские специалисты сообщили, что она может составлять 10—15 процентов стоимости всего судна. Известен случай, когда построенный в ФРГ турбоход не был принят заказчиком из-за чрезмерной шумности, и по истечении двух лет судно было продано за $\frac{2}{3}$ его строительной стоимости.

Коммунальное строительство. Сейчас многие, очень многие люди останавливаются в далеко не фешенебельных, но зато тихих гостиницах, предпочитая их гостиницам в центре, где ежеминутно раздается рев машин, срывающихся с места по зеленому сигналу светофора у соседнего перекрестка, где звучит гул машин, несущихся по соседнему путепроводу, и где, быть может, к тому же еще недостаточно эффективная звукоизоляция между комнатами или этажами.

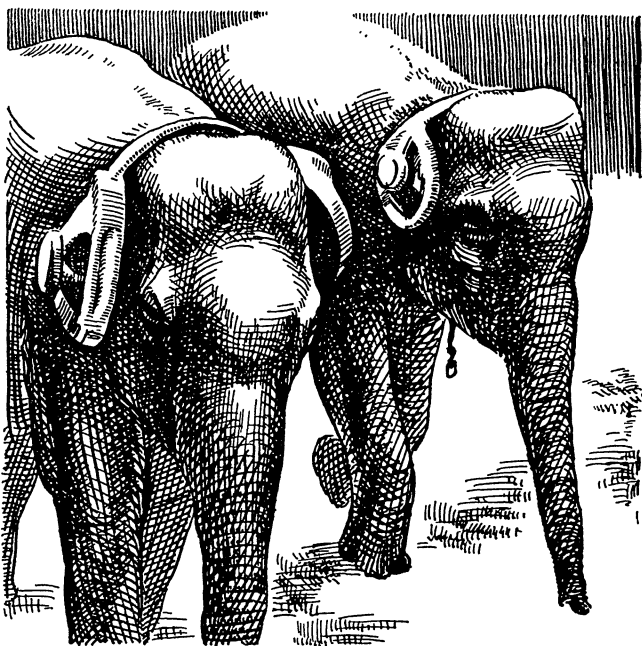
В Москве, Ленинграде и других городах строители жилых зданий стали располагать их таким образом, что на шумную улицу выходят стены, окна передних, кухонь и других вспомогательных помещений, а комнаты, могущие выполнять функцию спален, гостиных, столовых, располагаются на другой стороне здания, выходящей во двор. Вдоль путепроводов для транспорта возводятся против жилищных зданий высокие бетонные экраны, пропускающие к зданиям, в основном, дифрагированный звук, значительно более слабый, чем «прямой» звук.

Звукозащитные средства (последнего, четвертого эшелона) контактируют непосредственно с человеком. Чаще всего это протившумы, специальные протившумовые наушники. Они применяются тогда, когда человек должен входить в шумные помещения или работать у шумного оборудования.

Радикальное ли это средство? К сожалению, нет. Если даже полностью преградить путь шуму в слуховые проходы ушей, человек все же, хоть и в меньшей степени, будет его слышать вследствие так называемой костной проводимости звука. (Недаром, когда не было технических средств акустической диагностики, опытные механики определяли, хорошо ли работает машина, приложив к скуле импровизированный стетоскоп — гаечный ключ, опертый на вибрирующую поверхность.) Поэтому для работы в весьма шумных условиях применяют гермошлемы, похожие на шлемы космонавтов и охватывающие всю голову человека.

Шумы, оказывается, могут затормозить внедрение новой техники. Когда открылся первый участок железной дороги («Синкансэн») между Токио и Осакой, общественность ликовала, железнодорожники проливали слезы радости, император произнес хвалебную речь, вся страна была преисполнена чувством гордости. Еще бы, скорости 267 километров в час доселе не достигал никто на железной дороге! Разработали проект внедрения системы «Синкансэн» во всей стране.

Но вот стали поступать все учащающиеся жалобы на шум, производимый сверхскоростными поездами. Некоторые инженеры-железнодорожники заявили, что система «Синкансэн» устареет раньше, чем получит распространение во всей Японии, и что нужны новые, более «чистые» (в данном случае, не создающие большого шума и вибрации) системы.



Животные в городском зоопарке тоже плохо выносят машинные шумы. Протившумовые наушники для этих слонов пришлось изготовлять по специальному заказу.

Воздадим же хвалу такому немощному и даже почти комичному свисту, который издает теперь наша пригородная электричка, подъезжая к очередной станции. Этот тихий свисток — один из провозвестников неизбежной борьбы с усилившимся акустическим загрязнением окружающей среды — пришел на смену зычным гудкам, от которых вздрагивал не один житель в домах вблизи железных дорог.

До сих пор мы говорили о борьбе с шумом, имеющей целью оздоровление среды. Но уменьшение шумовых уровней — и это очень важно — увеличивает производительность труда человека. Последнее отмечают специалисты любых предприятий. Так, на московском почтамте уменьшение шума на 10—15 децибел повысило производительность труда при сортировке писем на 18 процентов. Годовая экономия при этом составила круглым счетом 1 миллион рублей.

Но, оказывается, есть предел, дальше которого уменьшение шума становится не только бесполезным, но даже нежелательным. Одна из фирм ФРГ обеспечила новое здание конструкторского бюро совершенной звукоизоляцией. Ни один звук с улицы, даже грохот тяжелых грузовиков, не долетал сюда. И что же? Инженеры-конструкторы стали жаловаться на непривычную, неестественную тишину. Пришлось установить электроакустическое устройство, воспроизводящее легкий, совсем легкий гул. Производительность труда и настроение работников сразу поднялись. (Гнетущее влияние «абсолютной» тишины было, впрочем, известно и ранее, из опытов над людьми в сурдокамерах. Очевидно, человек за миллионы лет своего развития привык к определенному уровню природных шумов и не может в короткий срок адаптироваться к абсолютной тишине.)

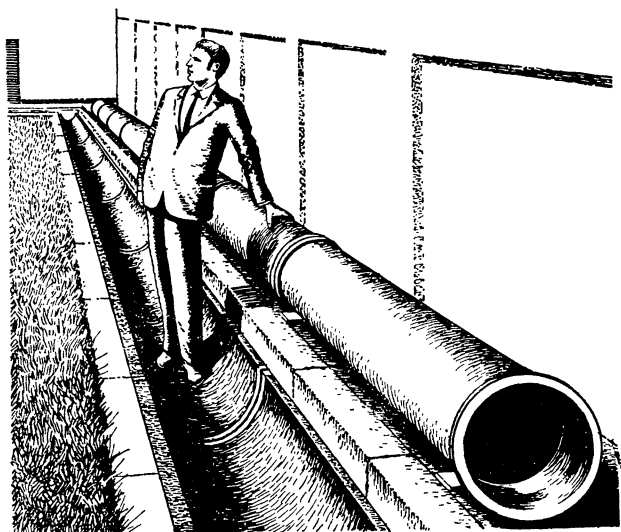
НОВАЯ ОПАСНОСТЬ ПОЛЗЕТ ИЗ ГЛУХОГО УГЛА

...включили «неслышимую» ноту Вуда. Последовал эффект вроде того, который предшествует землетрясению... волна ужаса распространилась на Шэфтсбюри авеню.

В. Сибрук. Роберт Вуд

Приведенный в эпиграфе отрывок из книги о знаменитом американском физике Р. Вуде, по-видимому, одно из первых описаний воздействия инфразвуковых колебаний на человека. «Неслышимая» нота включалась на репетиции в одном из театров в 1929 году с целью усиления сценического эффекта. Но этот эффект оказался настолько значительным, что режиссер тут же дал указание прекратить эксперименты.

Существует и другая версия, согласно которой Вуд, один из оригинальнейших физиков мира, рекордсмен и фантазер в науке, принес в театр инфразвуковой генератор (в данном случае это был действительно генератор неслышимых звуков), включил его во время представления и из своей ложи наблюдал, как зрителей охватило необъяснимое для них беспокойство и нервозность.



Мощный инфразвуковой излучатель в лаборатории профессора Гавро (Франция).

В дальнейшем обширные исследования по генерированию инфразвука и воздействию его на человека развернулись во всех странах мира. Сошлемся лишь на материалы Международного colloквиума по инфразвуку, состоявшегося в Париже в середине 70-х годов. Эти материалы составляют солидный сборник объемом около 500 страниц. Начнем с печально экзотических инцидентов, предположительно связанных с инфразвуком. Виднейший акустик Т. Тарноци доложил о гибели в гроте Борадль (Верхняя Венгрия) трех туристов в условиях резкого изменения атмосферного давления. В сочетании с узким и длинным входным коридором грот являл собой подобие низкочастотного резонатора, а это, как мы уже упоминали в соответствующей главе, могло послужить причиной резкого увеличения колебаний давления инфразвуковой частоты. Периодически наблюдавшееся появление судов — «летучих голландцев» с мертвым экипажем на борту также иногда предположительно приписывали мощным инфразвуковым колебаниям, возникающим во время сильных штормов, тайфунов. Снабдить бы все суда простейшими инфразвуковыми самописцами уровня, чтобы

можно было сопоставить затем изменения самочувствия экипажа с записанными колебаниями давления воздушной среды!

Пока же специалисты по охране окружающей среды ограничились тем, что установили, например, приемники инфразвука в верхних частях «точечных» зданий и при этом обнаружили следующее. Во время сильных порывов ветра уровень инфразвуковых колебаний (частоты 0,1 герца) достигал на тридцатом этаже 140 децибел, то есть даже несколько превышал порог болевого ощущения уха в диапазоне слышимых частот.

Элементарная частица нейтрино обладает, как известно, громадной проникающей способностью. Инфразвук — своего рода «акустическое нейтрино» — способен проходить без заметного ослабления через стекла и даже сквозь стены. Можно себе представить, что чувствуют не особенно здоровые люди в очень высоких зданиях при сильных порывах ветра.

Природные источники мощного инфразвука — ураганы, извержения вулканов, электрические разряды и резкие колебания давления в атмосфере, быть может, не столь уж часто докучают человеку. Но в этой вредной области инфразвука человек быстро догоняет природу и в ряде случаев уже перегнал ее. Так, при запуске космических ракет типа «Аполлон» рекомендуемое (кратковременное) значение инфразвукового уровня для космонавтов составляло 140 децибел, а для обслуживающего персонала и окружающего населения 120 децибел. Встреча двух поездов, движение поездов в тоннеле сопровождается появлением инфразвукового шлейфа.

Инфразвук в нашем повседневном окружении... На эту тему старейший английский акустик лауреат премии Рэля доктор Стефенс делал доклады на всех международных форумах. Инфразвуковые шумы, производимые градирнями теплоэлектроцентралей, различными устройствами всасывания воздуха или выпуска отработавших газов; неслышимые, но такие вредные инфразвуковые излучения мощных виброплощадок, грохотов, дробилок, транспортеров! Инфразвуковым шумам в судостроении и судовождении была посвящена большая работа в югославском судостроительном журнале.

В общем источников инфразвука хоть отбавляй. Поговорим теперь о том, каков же все-таки вероятный

механизм воздействия инфразвука на организм человека и удастся ли хоть в какой-то мере с этим воздействием бороться.

Длина инфразвуковой волны весьма велика (на частоте 3,5 герца она равна 100 метрам), проникновение ее в ткани тела также велико. Фигурально говоря, человек слышит инфразвук всем телом. Какие же неприятности может причинить проникший в тело инфразвук? Более сотни лет человечество усиленно изучает свой слуховой орган, занимающий лишь ничтожную часть поверхности тела, и все еще нельзя считать процесс слухового восприятия полностью изученным. Что же говорить о восприятии телом инфразвука? Естественно, об этом пока имеются лишь отрывочные сведения.

Медики обратили внимание на опасный резонанс брюшной полости, имеющий место при колебаниях с частотой 4—8 герц. Попробовали стягивать (сначала на модели) область живота ремнями. Частоты резонанса несколько повысились, однако физиологическое воздействие инфразвука не ослабилось.

Легкие и сердце, как всякие объемные резонирующие системы, также склонны к интенсивным колебаниям при совпадении частот их резонансов с частотой инфразвука. Самое малое сопротивление инфразвуку оказывают стенки легких, что в конце концов может вызвать их повреждение.

Мозг. Здесь картина взаимодействия с инфразвуком особенно сложна. Небольшой группе испытуемых было предложено решить несложные задачи сначала при воздействии шума с частотой ниже 15 герц и уровнем примерно 115 децибел, затем при действии алкоголя и, наконец, при действии обоих факторов одновременно. Была установлена аналогия воздействия на человека алкоголя и инфразвукового облучения. При одновременном влиянии этих факторов эффект усиливался, способность к простейшей умственной работе заметно ухудшалась.

В других опытах было установлено, что и мозг может резонировать на определенных частотах. Кроме резонанса мозга как упругоинерционного тела выявилась возможность «перекрестного» эффекта резонанса инфразвука с частотой α - и β -волн, существующих в мозгу каждого человека. Эти биологические волны отчетливо обнаруживаются на энцефалограммах, и по

их характеру врачи судят о тех или иных заболеваниях мозга. Высказано предположение о том, что случайная стимуляция биоволн инфразвуком соответствующей частоты может влиять на физиологическое состояние мозга.

Кровеносные сосуды. Здесь имеются некоторые статистические данные. В опытах французских акустиков и физиологов 42 молодых человека в течение 50 минут подвергались воздействию инфразвука с частотой 7,5 герц и уровнем 130 децибел. У всех испытуемых возникло заметное увеличение нижнего предела артериального давления. При воздействии инфразвука фиксировались изменения ритма сердечных сокращений и дыхания, ослабление функций зрения и слуха, повышенная утомляемость и другие нарушения.

Как упоминалось в одной из предыдущих глав, спектральные характеристики шума в звуковом диапазоне в настоящее время нормируются. Так как особенно травмируют нервную систему звуки высоких частот, то на этих частотах допустимые уровни шума малы. На низких частотах в слышимом диапазоне допускаются большие уровни звука. Но если подтвердится особое вредное действие инфразвука на человека, то, возможно, при нормировании инфразвукового шума придется уменьшать допустимые уровни против тех, которые разрешены для области 60—100 герц.

Существуют ли какие-нибудь меры борьбы с инфразвуком? Следует признать, что этих мер пока не так уж много. Упомянем оригинальный глушитель инфразвукового шума компрессоров и других машин, разработанный лабораторией охраны труда Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. В коробе этого глушителя одна из стенок сделана податливой, и это позволяет выравнивать низкочастотные переменные давления в потоке воздуха, идущего через глушитель и трубопровод.

Площадки виброформовочных машин могут являться мощным источником низкочастотного звука. По-видимому, здесь не исключено применение интерференционного метода ослабления излучения путем противофазного наложения колебаний. В системах всасывания и распределения воздуха следует избегать резких изменений сечения, неоднородностей на пути движения потока, чтобы исключить возникновение низкочастотных колебаний.

Некоторые исследователи разделяют действие инфразвука на четыре градации — от слабой до... смертельной. Классификация — вещь хорошая, но она выглядит довольно беспомощно, если не известно, с чем связано проявление каждой градации.

Да, человечество еще не сдернуло полностью маску с незнакомца, именуемого инфразвуком. Но рано или поздно это будет сделано. Остается надеяться, что черт окажется не таким страшным, как его сейчас малюют.

О ЗВУКОВОЙ СМЕРТИ, КОТОРАЯ РАДУЕТ МОРЯКОВ

Мы поведем речь о смерти исконного врага моряков всех народов и времен — «морского желудка» баянуса и ему подобных мелких организмов, которыми обрастает подводная часть кораблей, в результате чего их скорость заметно снижается.

Падение скорости может достигать 1—1,5 узла, что наносит значительный материальный ущерб пароходам. Естественно, с этим мириться трудно. Наиболее распространенный прием борьбы — применение необрастающих красок для подводной части судов. Однако срок службы этих красок, как правило, не превышает года, после чего судно необходимо вновь доковать и окрашивать. К тому же краски (эффект которых основан на выщелачивании в воду ядовитых веществ, таких, например, как мышьяк) загрязняют воду и в течение довольно продолжительного времени (когда судно уже давно ушло из данного района) воздействуют на те мелкие морские организмы, убивать которых нет никакого смысла.

Вот и возникла мысль использовать для целей борьбы с поселениями баянусов и мидий мощные колебания ультразвукового диапазона. Несколько ультразвуковых вибраторов укрепляют вдоль корпуса судна изнутри к его обшивке. Вибраторы возбуждают колебания обшивки, вблизи нее возникает мощное ультразвуковое поле.

Каков же механизм губительного воздействия ультразвука на подводных «колонистов»? Прежде всего, обратили внимание на механические силы кавитационной природы. Известно, что при значительном разрежении (в частности, вследствие мощных упругих колебаний) в жидкости образуются участки разрыва сплош-

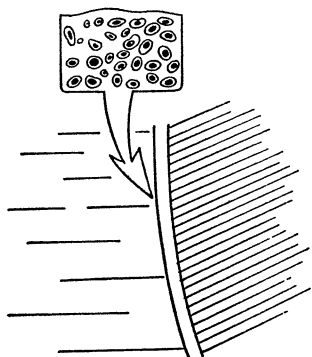
ности, в которые диффундирует растворенный в ней воздух, а при более сильных разрежениях — и водяной пар.

Кавитация на судах более известна как вредное явление. Она вызывает эрозию лопастей гребных винтов, превращая их за короткое время в обглоданные изъязвленные пластинки; в рыбо- и гидролокаторах образующиеся при особенно мощном излучении облака кавитационных пузырьков у вибраторов не пропускают излучаемые и принимаемые сигналы. Но вот в деле борьбы с биологическими объектами, поселяющимися на корпусах кораблей, кавитация явно полезна. Довольно скоро после появления кавитационные пузырьки захлопываются. При этом в воде возникают значительные силы и смещения, приводящие к гибели как самих обрастателей, так и их личинок. Да и само мощное звуковое поле, связанное с возникновением пульсаций давления в воде, в значительной мере затормаживает процесс оседания личинок на корпусе и их прикрепления к нему.

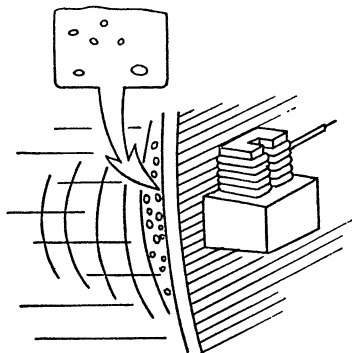
Долгое время других причин гибели обрастателей под действием мощного ультразвука не искали. Потом заметили, что при кавитации и связанных с ней процессах электролиза выделяются азотная кислота и перекись водорода, это также не может не повлиять на жизнедеятельность обрастателей. Высказывались и другие гипотезы о причинах их гибели: возникающие в воде при кавитации тепловые поля, пульсации давления, мешающие личинкам обрастателей закрепляться на поверхности корпуса, и так далее.

Как бы то ни было, ультразвуковое противообрастающее облучение «работает». Частоты и интенсивность излучаемого звука выбирают такими, чтобы он не вызывал травмирующего действия на личный состав судов (ведь при работе вибраторов и вызванных ими колебаниях обшивки определенное излучение проходит и внутрь судна). Оказалось, что достаточно сильное угнетающее действие на белянусов и их собратий наблюдается уже при мощностях вибраторов 200—300 ватт. При большой толщине обшивки судна, как установил В. В. Корнев, мощность вибраторов приходится увеличивать.

Сколько же вибраторов требуется для эффективных мероприятий против обрастания? Может быть, ими потребуется усеять подводную часть судна? П. И. Щер-



Характерная картина наружной поверхности подводной части судна, не защищенной от обрастания: морские желуди и другие организмы делают поверхность обшивки шероховатой.



Кавитационные пузырьки и звуковое поле, возникающие на наружной поверхности обшивки при работе ультразвукового вибратора, не дают развиваться на обшивке колониям морских организмов.

баков указывает, что на отечественных судах устанавливают не более шести вибраторов, а иногда их количество еще сокращают. Режим их работы может быть либо непрерывным, либо периодическим. Последнее обусловлено тем, что процесс прикрепления личинок обрастателей к корпусу судна продолжается несколько часов (до 20), поэтому даже при периодическом включении вибраторов вероятность уничтожения личинок достаточно велика. Во время движения судов вибраторы можно включать реже, так как возникающие при ходе судна гидродинамические силы содействуют срыву личинок с поверхности обшивки.

И если случайные купальщики в какой-либо из гаваней почувствуют резь в ушах, беспокоиться не следует: просто одно из стоящих вблизи судов включило вибраторы ультразвуковой защиты. Но ультразвук этот таков, что убивает он только мелкие морские организмы, которые любят селиться большими колониями на подводной части судов.

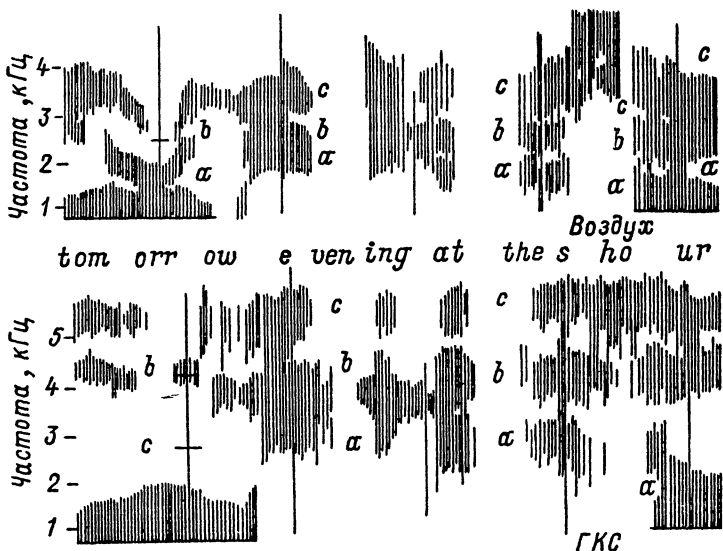
ОТКУДА ВЗЯЛАСЬ У ЧЕЛОВЕКА «УТИНАЯ РЕЧЬ»?

Термин «гелиевая речь» установился в международной практике уже более двух десятилетий назад. Связан он с глубоководными погружениями водолазов и аквалангистов. Во избежание физиологических нарушений в их скафандры вместо обычного воздуха вводят гелиево-кислородную смесь. Речь водолаза при этом сильно деформируется. Частота резонансов полостей рта и носоглотки, участвующих в речеобразовании, смещается вверх, соответственно изменяются частоты характерных составляющих речи — формант, определяющих ее разборчивость. При повышенных давлениях это смещение еще увеличивается, и тогда речевая связь между водолазом и обеспечивающим судном становится практически невозможной. Учитывая «бубнящий» характер такой речи, ей дали еще одно наименование — «утиную».

Значительные работы по улучшению условий речевой связи выполнены в США и Японии. Один из первых методов исправления искажений речи в гелиево-кислородной смеси был основан на искусственной «обратной» деформации спектра речевого сигнала в тракте магнитофонной записи. Оказалось, что метод невозможно использовать для непосредственной связи, так как требуется известное время на запись и воспроизводство обработанной речевой информации.

Лабораторией прикладных наук военно-морских сил США в Бруклине совместно с рядом фирм было выполнено много исследований и разработок по обеспечению нормальной речевой связи с водолазами и акванавтами при их глубоководных погружениях. Хороший результат получен при использовании так называемой вокодерной техники, применяемой в искусственных синтезаторах речи. Использовались многоканальные (до 34 частотных каналов) вокодеры.

Дальнейший прогресс обусловило привлечение цифровой техники. Речевой сигнал, сначала несколько растянутый электронным трактом во времени, превращается в серии двоичных импульсов преобразователем «аналог-цифра». Полученные импульсные группы вводятся в накопительные регистры. Далее серии импульсов переводятся в непрерывный сигнал преобразователем «цифра-аналог» с учетом обеспечения нормального времени произнесения слов.



Спектрограмма фразы на английском языке, произнесенной в воздухе (верхний рисунок) и в гелиево-кислородной смеси (нижний рисунок). Видно усиление колебаний высоких частот при звучании речи в гелиево-кислородной смеси.

При опытах связи с акванавтами подводной исследовательской лаборатории «Силэб» было получено увеличение разборчивости речи с 20 процентов (что характерно для обычной телефонной связи с человеком, находящимся в гелиево-кислородной атмосфере) до 90 процентов. Заметно возросла естественность звучания речи в телефоне.

Специалисты признают, что хотя в принципе проблему улучшения качества речевой связи с водолазами и акванавтами можно считать решенной, потребуется еще большие усилия для того, чтобы сделать аппаратуру связи более простой, дешевой и компактной. Нуждаются в отработке электронные устройства, корректирующие «гелиевую речь» при изменении глубины нахождения водолаза или акванавта.

В подводной эре будущего устройства для коррекции речевой связи как между самими «гомо акватикус» — людскими обитателями подводного мира, так и между ними и людьми на поверхности моря или земли займут достойное место.

МУЗЫКА РАДУЮЩАЯ И МУЗЫКА РАБОТАЮЩАЯ

Когда б ты знал, что эти звуки,
Когда бы тайный их язык
Ты чувством пламенным проник,—

.
Тогда б душа твоя, немея,
Вполне бы радость поняла...

Д. Веневитинов. К любителю музыки
Все — музыка и свет.

А. Блок

Применение специально подобранной музыки увеличило производительность труда сортировщиц почты на московском почтамте на 20 процентов.

Из газет

В уста одного из персонажей «Каменного гостя» Пушкин вложил следующие слова:

...Из наслаждений жизни
Одной любви музыка уступает;
Но и любовь мелодия...

Музыка, как уже упоминалось, колыбель акустики, и не коснуться ее, говоря об удивительном в мире звука, невозможно. Хотелось бы сказать подробнее о поисках человечеством правильных интервалов между тонами разной частоты, рождающих гармонические созвучия; о перевороте, совершенном в XVII веке одним неведомым ранее органистом, которому удалось то, что не удавалось Кеплеру и Эйлеру, и который создал достаточно совершенный равномерно темперированный музыкальный строй, сохранившийся до нашего времени; о великих мастерах прошлого, которые, не имея современных физико-математических представлений о звучании тел, создавали тем не менее неповторимые по качеству скрипки; о музыкальных исканиях и порождениях XX века — «узкоинтервальной» четвертьтонной музыке; о различных «музыках шумов», «рисованной музыке», об электроакустических музыкальных синтезаторах и прочем.

Хотелось бы... Но по необходимости приходится ограничивать круг рассматриваемых тем. Впрочем, уже достаточно давно широкий круг читателей мог ознакомиться с музыкальными темами (см. хотя бы книгу

Г. Анфилова «Физика и музыка», 2 издание которой вышло более двух десятилетий назад).

Светомузыка. Новое ли это явление в области «перекрестных» психофизиологических эффектов? Еще античные философы говорили о слиянии эффектов восприятия музыки и живописи. Соединить цветовые ощущения с музыкой пробовал Леонардо да Винчи.

Ньютон после своих знаменитых опытов по разложению с помощью призмы белого цвета на составляющие отметил (скорее, быть может, формально), что «...ширина семи основных цветов спектра пропорциональна семи музыкальным тонам гаммы или семи интервалам между нотами октавы».

Дед великого натуралиста Ч. Дарвина Эразм Дарвин в книге «Храм природы», вышедшей в 1803 году, указывает уже на возможность создания практического светомузыкального устройства. В этом устройстве свет от мощной лампы проходит через цветные стекла и падает на белую стену. Перед стеклами помещают подвижные решетки, соединенные с клавишами клавикордов, и «...производят одновременно слышимую и видимую музыку в унисон друг с другом». Далее Э. Дарвин пишет:

В этом случае родство двух сестер — Музыки и Живописи — дает им право заимствовать друг у друга метафоры: музыканты говорят о блестящей музыке, о свете, о тенях концерта, а художники — о гармонии цветов и тоне картины.

Разумеется, цветоклавикорды Эразма Дарвина — это не настоящая светомузыка в ее позднейшем понимании, как не настоящей светомузыкой являются и современные цветомузыкальные устройства в различных торговых салонах и на выставках. Загляните в какой-нибудь магазин «Электроника», где демонстрируется подобное устройство. Синхронно с ритмами самбы или танго вспыхивают за ажурной решеткой спрятанные там разноцветные лампочки. Нет движения света, нет динамики его формы, вообще бесполезно искать здесь какие-либо принципы светомузыкальных соответствий.

Первыми, кто попытался обосновать психоэстетические основы светомузыки, были русские музыкальные гении Скрябин и Римский-Корсаков. За основу светозвуковых ассоциаций они брали прежде всего соответствия тональностей и цвета. Скрябин написал к своему «Прометею» специальную световую партитуру. «Он

чувствовал симфониями света», — сказал о Скрябине поэт К. Бальмонт.

Но если Скрябин и Римский-Корсаков расходились даже в принципах простейших соответствий — в мнении о том, каким нотам октавы соответствуют те или иные цвета, — то что же говорить о более сложных принципах светомузыки: световом выражении общей идеи современного музыкального произведения, направленности его отдельных частей и т. п.? Психофизиологические исследования в области светозвука находятся, по существу, в начальной стадии. Приведем некоторые данные этих исследований, полученные советскими акустиками И. Л. Ванечкиной, Б. М. Галеевым, Р. Х. Зариповым и другими.

Был, например, проведен анкетный опрос членов Союза композиторов СССР с целью определения закономерностей их цветового слуха при подобном бисенсорном воздействии. Результат оказался несколько неожиданным: у опрошенных отсутствует «видение» цвета отдельных тонов. Однако многими отмечается разделение тонов по «светлостному» признаку: низкие тона — темные, высокие — светлые. Это подтверждают выводы и других авторов.

Распространенной оказалась аналогия тембр звучания — цвет. При этом доминантной опять-таки является светлостная характеристика. Инструментам, у которых основные спектральные составляющие, определяющие тембр, находятся в низкочастотной области, соответствуют темные тона (коричневый, фиолетовый, черный), инструментам высокочастотной области — светлые тона (голубой, розовый, желтый, оранжевый). Восприятие тональностей также происходит через светлостные характеристики: цвета мажорных тональностей светлее, чем цвета минорных.

Чаще всего увеличение интенсивности звукового раздражителя сопоставляется с увеличением интенсивности отвечающего ему светового. Но при использовании светомузыкальных композиций натолкнулись и на такое психологическое явление, когда происходит «замещение раздражителей», то есть когда более сильному музыкальному раздражению у подопытного лица соответствует более слабое световое раздражение.

Количество возможных светозвуковых ассоциаций огромно. Можно предполагать, что наиболее часто встречающимися окажутся варианты бисенсорного

воздействия, отвечающие общезначимым ассоциациям, натуральным условным рефлексам, например: ритм, динамика звука — ритм, динамика «светового жеста»; мелодическое развитие музыкальной композиции — графическое развитие светового рисунка; громкость звука — размер светового пятна; тональное развитие — развитие колорита всей видимой картины и т. п.

Ошибочно думать, однако, что светомузыка ограничивается областью соответствия ощущений разнородных органов чувств. Возможны совершенно иные эффекты. Музыканты, как и писатели, часто применяют прием контрапункта, когда одна тема сходит, другая же одновременно развивается, растет. Скрябин, по-видимому, первый выразил идею комбинированного светомузыкального контрапункта. Он говорил:

— Нужны световые контрапункты. Свет идет своей мелодией, а звук — своей... Мелодия может, например, начинаться звуками, а продолжаться линией светов... Как это волнует. Как будто какую-то неизведанную Землю открыл.

Кроме светомузыки возможны другие «перекрестные эффекты» в области одновременного восприятия различными органами чувств. Поэт Игорь Северянин писал о «сладком теноре жасмина», сопоставляя эффект от обоняния запаха цветов со звуковым (и одновременно вкусовым!) ощущением. Некоторые предлагали при исполнении музыкальных произведений, связанных с природой (например, поэм «В лесу» и «Море» Чюрлениса), выпускать в зал из баллонов вещества, создающие требуемые запахи (лишвы, хвои, морских водорослей). Один из исследователей указывает, что у опрошенных композиторов при прослушивании музыки возникали обонятельные и даже осязательные ассоциации («шероховатая» музыка).

В романе американского фантаста Р. Бредбери «451° по Фаренгейту» описываются «телевизионно-музыкальные» стены будущего жилища. В такт музыке по стенам перемещаются, пробегают в различных направлениях разноцветные сполохи переменной интенсивности. Быть может, эта картина недалека от одной из ближайших по времени и более или менее совершенных реализаций светомузыкальных систем.

У нас в стране интерес к светомузыке велик. В Харькове состоялось открытие городского концертного зала цветомузыки. Присутствовавшим на премьере

посетителям (их уже нельзя назвать просто слушателями) были предложены произведения Вагнера, Чайковского, Листа, Дебюсси. Аналогичные концерты состоялись в Москве, Казани, Ленинграде и других городах страны, причем в каждом случае характер светового сопровождения и системы реализации этого сопровождения были различными.

Дважды на Всесоюзных акустических конференциях (в 1977 и 1983 годах) виднейший отечественный энтузиаст светомузыки Булат Галеев демонстрировал светомузыкальную композицию по произведению композитора Г. Свиридова «Маленький триптих». Быть может, здесь прилагательное «светомузыкальное» не совсем точно, ибо кроме световых полотен, переливов, оттенков в композиции присутствовали зрительные образы, формы. Это был музыкально-зрительный спектакль, и был он по-настоящему захватывающим (нашлись, впрочем, как всегда, и противники).

Захватывающий... Но чем именно? По своему замыслу светомузыка должна захватывать совокупностью обоих компонентов спектакля. Возникает проблема соразмерности: ни один компонент не должен преобладать над другим, подавлять его. Что же получилось?

...Композиция, видимо, в какой-то мере представляла жизнь человека. Вначале на левом краю экрана появилась стройная елочка с квадратными (пусть так) ветвями. Но вот вокруг нее замелькали какие-то бегающие пятна, беспокойные, грязные следы — возможно, отображающие неприятности человека. Зрительный образ был представлен с такой силой, что многие в этот момент начисто забыли о несомненно талантливой музыке. В конце поэмы не менее выразительный образ — мерцающий граненый алмаз в форме сердца. Мерцания замедляются, тона гаснут и еще до полной остановки этих пульсаций музыка (хотя она продолжается) вновь исчезла из сознания многих присутствовавших, подавленная весьма сильным зрительным ощущением. Да, светомузыка, пожалуй, еще более сложное искусство, чем отдельно взятые музыка и формы искусства, воспринимаемые посредством зрения, но хочется думать, что музыкально-зрительная форма искусства еще порадует ее любителей.

В приведенном выше стихотворном отрывке Пушкин не случайно роднил музыку с мелодией. Действи-

тельно, мелодия — одна из основ музыки. Правда, Верди утверждал, что в музыке есть нечто большее, чем мелодия. Но это мог сказать сам великий мастер мелодии, для большинства же слушателей мелодия значит очень много. Недаром даже среди бурь современной эстрадной музыки, кричащей о «времени стрессов и страстей», вдруг проглянут мелодичные, спокойные оркестры Поля Мориа или Франсиса Гойи, и их тоже приемлют поклонники стрессов и страстей.

В чем тайна красоты мелодии, есть ли какие-либо физико-математические основы мелодии? Кем-то из исследователей было подмечено, что красивой мелодии свойственны большие значения производной (математической) от высоты тонов по времени. Вспомните красивые мелодии народных песен «Над полями да над чистыми», «Колокольчик, дар Валдая». Действительно, в некоторых строках этих песен есть значительные «перепады» высоты тонов соседних звуков. Но иногда мелодия состоит из ряда тонов, стоящих близко друг к другу в музыкальной гамме, и — о, чудо! — эта мелодия тоже всем нравится.

А может, и хорошо, что пока нельзя в полной мере поверить алгеброй гармонию? Иначе музыкальные партитуры вдруг превратятся в стандартные наборы программ, как у ЭВМ, и перестанут радовать слушателей.

Впору перейти к музыке «работающей». Кроме указанного в эпиграфе проверялось влияние спокойной, относительно негромкой музыки на работниц обувного конвейера. И здесь было получено подтверждение того, что при подобной музыке лучше работается, меньше замечается удручающая монотонность конвейерного труда. Перспективы использования надлежащим образом подобранной музыки здесь обширные.

Музыка может сообщить человеку утром трудовой настрой. В радиовещании Прибалтийских республик чаще используется для этого спокойная мелодичная музыка. А если из репродуктора несутся трескучие марши или пьесы некоторых современных композиторов, богатые диссонансами и формалистическими вывертами, то это указывает лишь на неосведомленность музыкального редактора об основах психоакустики.

МУЗЫКА ЛЕЧАЩАЯ И МУЗЫКА КАЛЕЧАЩАЯ

Она же (музыка) является утешением в страданиях. Поэтому флейты и наигрывают для людей, пребывающих в скорби, облегчая тем самым страдания последних.

Секст Эмпирик (II—III века н. э.). Против музыкантов

Наша королева исцеляет от всех болезней, но без всякого прикосновения, — она просто играет больному песенку в соответствии с его болезнью.

Ф. Рабле Гаргантюа и Пантагрюэль

Мы вынуждены (курсив Гегеля — И. К.) слышать звук, потому что последний, отделяясь от предмета, давит на нас.

Г. Гегель. Энциклопедия философских наук

Музыкальные браконьеры

Преодолевают звуковые барьеры.

А. Вознесенский

Музыка может выступать и в других, причем взаимно противоположных ролях — как целебное средство и как фактор, угнетающий человека. Еще Секст Эмпирик, активнейший из философов-скептиков, написавший ряд трактатов против представителей различных профессий, в трактате «Против музыкантов» принужден все же признать целебную силу музыки. Пифагор указывал на музыку как на главнейшее средство гигиены духа. В различные века нашей эры интерес к психологическому воздействию музыки не ослабевал.

В США была организована Национальная ассоциация музыкотерапевтов; представители ее составляют лечебные каталоги музыки; это так называемая музыкальная фармакопeia («музыкапeia»). У истоков движения в США стоял еще Т. Эдисон, отобравший ряд музыкальных произведений, которые должны были воздействовать на эмоциональное состояние слушателей. Некоторые произведения рекомендовались «для умиротворения», другие — «для приятных воспоминаний», «для любви», «для пробуждения веселости» и даже «для развития чувства преданности». В России в 1913 году виднейшим психиатром В. М. Бехтеревым также было основано «Общество для выяснения лечебно-воспитательного значения музыки и ее гигиены».

Наиболее часто нуждаются в действии музыки как лечебного средства для уменьшения раздражительнос-

Musical score for a piano piece, consisting of eight systems of staves. The first system has a treble and bass staff with a "cresc." marking. The second system has a treble and bass staff with a "ff cresc." marking. The third system has a treble and bass staff with a "cresc." marking. The fourth system has a treble and bass staff. The fifth system has a treble and bass staff. The sixth system has a treble and bass staff. The seventh system has a treble and bass staff. The eighth system has a treble and bass staff. The music is in 2/4 time and features various chords and melodic lines.

Вот он — рецепт лекарства, действующего порой лучше медицинских средств, принимаемых внутрь.

ти, чувства тревоги, нервного утомления, для подъема тонуса. Какую же музыку следует предложить в этих случаях? Веселую, бравурную, легкую, эстрадную? Конечно, здесь многое зависит от музыкального вкуса и от характера человека. Но во многих случаях помогают произведения Шопена, Шуберта, Бетховена, Прокофьева. И, конечно же, Баха, всеисцеляющего Баха, имя которого называет почти каждый из опрошенных лиц.

Каков же механизм целебного воздействия музыки? Некоторые исследователи полагают, что он обусловлен прежде всего ассоциативными памятными связями. Слов нет, под камерную (да не только камерную) музыку Шумана, Скрябина, Рахманинова хорошо «вспоминается», всплывают умиротворяющие ассоциации детских и юношеских лет. Но, по-видимому, музыка-терапия обусловлена не только этими факторами. Иначе, как, например, объяснить, что ипохондрик, по свидетельству специалистов, может испытывать облегчение, слушая скорбную музыку, а сверхвозбужденный больной — успокаивается при звуках быстрых, резких музыкальных композиций?

Играет роль даже характер и тип инструментов. Один любит слушать скрипку, другой предпочитает всем инструментам фортепиано. Находятся слушатели, которым подавай кларнет, арфу, саксофон. Не изучена продолжительность времени, в течение которого сохраняется целебное музыкальное воздействие. Приходится признать, что пока эффективность современной врачебной музыки еще достаточно далека от той, которой обладала музыка королевы Квинтэссенции из сказочной страны Энтелехии, придуманной мэтром Франсуа Рабле.

Зато вошла в силу музыка, калечащая как здоровье, так и музыкальные вкусы людей. Особенно преуспевает в этом рок- и поп-музыка.

Вот некоторые выдержки из высказываний горожан в газетах. Музыкальный шум иными устроителями нашего отдыха рассматривается как своего рода обязательный компонент «культурного обслуживания». Ни покататься на теплоходе, ни погулять по парку, ни побеседовать с другом в кафе мы практически не можем. Музыкальный шум — это не радужный признак культуры, а печальное последствие нашего терпимого отношения к проявлениям бескультуры — вы-

ставленным на подоконники мощным магнитофонам или динамикам, это, в сущности, и бесконтрольная «эстетическая» пропаганда.

Громоподобная техномызыка легче всего находит себе почитателей среди юных. Некоторые диск-жокеи осуществляют совершенно недопустимые приемы варьирования частотными и уровневыми характеристиками звуковоспроизводящих устройств, делающими из музыки своеобразный наркотик (конкретно о том, в чем заключаются эти приемы, мы не сообщаем, чтобы они не получали дальнейшего распространения). Немудрено, что у любителей подобной музыки нередко наблюдаются нервные расстройства.

Как же бороться с чрезмерно громкой музыкой? На эстрадных представлениях — осуществлять контроль характера и уровней громкости звуков; если же дело касается ваших громогласных соседей — то здесь, быть может, подойдет совет: Если до поздней ночи вас беспокоила громкая музыка, раздававшаяся из соседней квартиры, самое лучшее — громко постучать в дверь неугомонных соседей в четыре часа утра, когда они уже улеглись и уснули, и поблагодарить за концерт. Эффект гарантирован. Быть может?..

А теперь, когда мы поговорили в ряде очерков о звуках, издаваемых либо воспринимаемых человеком, травмирующих его или дающих ему успокоение и наслаждение, впору поговорить о звуках «малых сих» — окружающего нас животного мира, и среди них прежде всего о звуках, издаваемых существами, обитающими в водоемах планеты.

БОЛТЛИВЫЙ «МИР БЕЗМОЛВИЯ». ДВА СЛОВА ОБ ЭХОЛОКАЦИИ В ПРИРОДЕ

Те, кто обрекает всех рыб на
молчание и глухоту, весьма
мало знают природу рыб.

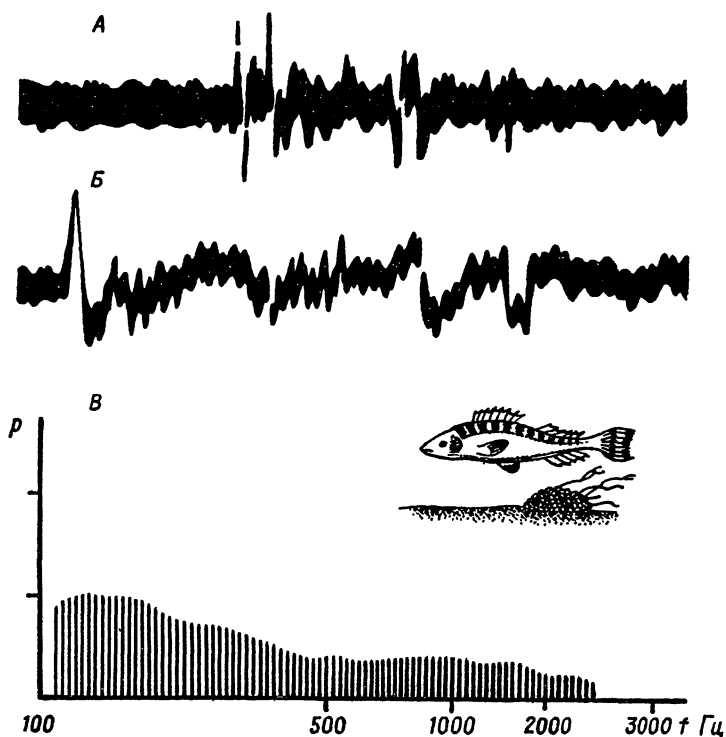
Клавдий Элиан

О голосах птиц, животных говорить не приходится: каждый человек слышал их много раз, иногда с наслаждением, иногда с тревогой. В работе орнитолога и зоолога XIII века Ф. Гогенштауфена уже содержались интересные сведения о строении слуховой системы некоторых пернатых. Укажем лишь, что сейчас птичьи голоса иногда используются в практических целях. Так, чтобы предотвратить столкновение птиц с самолетами (для которых они могут оказаться губительными), транслируют через мощный репродуктор записи криков ужаса самих птиц, и эти крики отпугивают пернатых от трассы самолета. Известен опыт воспроизведения магнитофонных записей тех же птичьих голосов для того, чтобы отгонять полчища насекомых от посевов или садов.

Совсем другое дело — голоса обитателей моря. Конечно, замечание древнеримского писателя Элиана о возможности их звукового общения было забыто, и даже великий акванавт Жак-Ив Кусто, до времени не интересовавшийся подводной акустикой, назвал одну из своих книг о глубинах океана «Мир безмолвия» (впоследствии он, правда, пользовался уже определением «мир без солнца»). Чувствительные гидрофоны, совершенная звукоанализирующая аппаратура позволили в наше время морским биоакустикам в короткий срок ликвидировать отставание от их коллег, занимающихся акустикой воздушной и наземной фауны.

Теперь и вопрос начинают ставить по-иному: а много ли вообще есть представителей подводной фауны, не прибегающих к звуковой связи, ведь звук распространяется в воде значительно лучше, чем электромагнитные волны.

Изучены характер и назначение издаваемых подводными живыми существами звуковых сигналов. Они в общем-то имеют такое же происхождение и назначение, как и у наземных живых существ: это сигналы призыва, агрессии («боевой клич»), оборонительные.



Звуки угрозы судака: А, Б — временная зависимость сигнала [осциллограмма]; В — частотная зависимость компонент сигнала [спектрограмма].

В период нереста звуковая активность рыб возрастает. Азовский бычок, например, исполняет целые нерестовые песни. Нерестовые звуки напоминают кваканье, верещание, скрип, они активизируют самок, которые начинают двигаться в сторону источника звука.

У амфибий идентифицирован такой сложный сигнал, как сигнал самки, отметавшей икру и предупреждающей самца о том, чтобы он не тратил напрасно, по выражению биологов, «репродуктивный потенциал». Как видим, звуковое общение в данном случае содействует реализации мудрого закона природы о сохранении каждого биологического вида.

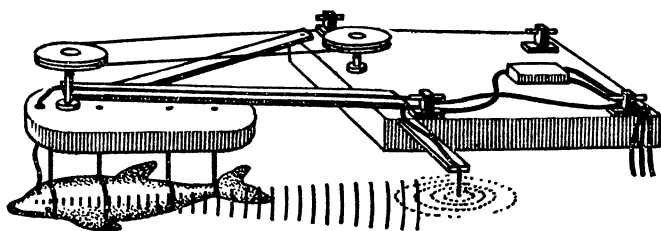
Определенную биологическую информацию несут звуки движения некоторых рыб; при питании возникают подводные звуки, связанные с захватом и пере-

тиранием пищи. В СССР выпущены обширные атласы звуков, издаваемых различными обитателями подводного мира. Исследователям понадобилось достаточно длительное время, чтобы определить характер и расположение слухового органа (или группы органов) у рыб. Рецепторы звука, как правило, находятся в голове рыбы, но у некоторых рыб (например, трески) слуховое восприятие возможно с помощью так называемой боковой линии тела. Как похожи разработанные человеком еще в 30-е годы системы шумопеленгаторных приемников по бортам корабля на боковую рецепторную линию рыб! У тюленей наибольшая плотность рецепторов, реагирующих на звук, наблюдается в ... усах.

Обнаружены два типа слуховых аппаратов: аппарат, не имеющий связи с плавательным пузырем, и аппарат, в составе которого есть плавательный пузырь. Пузырь действует подобно резонатору, и у рыб со слуховым аппаратом второго типа слух более чувствителен.

У человека чувствительность слуха на различных частотах определяется достаточно просто. Интенсивность звука данной частоты медленно увеличивают. При определенной интенсивности человек говорит: «слышу». Пороговая чувствительность слуха на этой частоте определена. А как подаст рыба сигнал о том, что она слышит данный звук? Американские ученые определяли момент начала восприятия звука акулой по реакции ее сердечной мышцы.

Максимальной была чувствительность слуха акулы в области частот 20—160 герц, причем интересно, что слуховые пороги по звуковому давлению, колебательному смещению и колебательной скорости частиц сре-



Дельфин, помещенный в установку для определения пространственных характеристик направленности его эхолокационного аппарата.

ды у акулы менялись в значительно большей степени, чем у человека.

Громадное количество работ посвящено звуковым сигналам дельфинов. Сигналы эти особенно разнообразны и совершенны. Некоторые исследователи усматривают сходство сигналов дельфинов с древними человеческими языками. Феноменальна способность дельфинов к звукоподражанию. Ожидают в связи с этим, что когда-нибудь начнется сознательный диалог между человеком и дельфином. В. В. Богородский, наблюдая «переговаривающихся» нарвалов, отметил, что сигналы некоторых особей выполняли функцию управления остальными особями.

Косатки и дельфины из различных морей, по-видимому, могут в той или иной степени понимать друг друга, о чем свидетельствует такой эксперимент. Двум косаткам, до тех пор молчаливым, предоставили возможность в течение целого часа разговаривать по телефону (приемниками и излучателями звука, разумеется, служили гидрофоны). Одна из косаток находилась в аквариуме в штате Вашингтон США, другая — в Ванкувере (Канада). Исследователи отмечали, что беседа была очень оживленной.

У тюленей выявлены не только высокая способность к звукоимитации, но и музыкальный слух. Группе подопытных тюленей спели часть народной песни жителей Гебридских островов. Один из тюленей чистым контральто повторил мелодию.

Изучению живых звуков моря в значительной мере содействовало широкое распространение различных подводных аппаратов. В нашей стране начало было положено подводной лодкой «Северянка», отслужившей свой воинский срок и переоборудованной затем для глубоководных исследований. Велико было удивление экипажа лодки, когда, попав в стаю сельди, он обнаружил, что эта небольшая рыба может издавать довольно интенсивные звуки высокого регистра! Сразу же стенгазета лодки «Рыбий глаз» была переименована в «Рыбий глас».

Новые подводные аппараты — буксируемые, автономные — погружаются на глубины, недоступные подводной лодке прошлого поколения. И здесь гидронавтам открываются среди прочих и новые акустические феномены. Автору давно хотелось побеседовать об этом с М. И. Гирсом, который имеет на своем счету

наибольшее в нашей стране количество глубоководных погружений в самых различных аппаратах и был наречен журналистами «гидронавтом № 1». Но как было повидать его, если на Канарских островах, где условия для погружения особенно удобные, он бывал, пожалуй, чаще, чем у себя дома на Васильевском острове?

Беседа все же состоялась. Для начала вспомнили, как семилетний Миша Гирс не без труда осваивал конькобежное искусство на катке Центрального парка культуры и отдыха. Кажется, это было совсем недавно, но вот теперь М. И. Гирс — капитан-наставник, освоивший в совершенстве технику гидронавтики, обучивший глубоководным погружениям сначала сам себя (ибо у нас не было специалистов в этой области), а затем и многих других специалистов — гидронавтов. Он произвел многие десятки разнообразных, порой опасных погружений в Черном, Средиземном, Охотском и других морях, в Атлантическом океане.

Разговор касался лишь одного вопроса — применения акустической техники при подводных погружениях и исследованиях.

— Конечно, роль ее очень велика, — ответил Гирс. — Можно определять места зарождения косяков рыб, пути их миграции. Хотя гидрофонные системы, ввиду относительно малого водозмещения подводных аппаратов, менее совершенны, чем судовые шумопеленгаторы, но все же чувствительные гидрофоны легко улавливают звуки морских обитателей. Очень характерны звуки, издаваемые косатками, их ни с чем не спутаешь. В принципе можно передавать на поверхность звуки моря по гидроакустическому телефону.

Говоря о звуках обитателей моря, мы до сих пор имели в виду прежде всего практическую цель — возможность их обнаружения и отлова. Но есть еще один аспект, связанный уже не с практикой, а скорее с психологией. Представим себе на мгновение лес без птичьего пения. Трудно, тоскливо человеку в таком мертвом лесу. Можно понять, почему свободные от вахты подводники во время длительных автономных плаваний без выхода на поверхность вдруг сгрудятся у рубки гидроакустика, попросят его дать хоть немного послушать, что делается за бортом. Крикам косаток моряки радуются так же, как они радовались бы птичьим песням в лесу, в поле, в саду.

И чем ближе будет человек к веку гидрокосмоса, чем более глубокие горизонты моря он будет обжи-

вать, тем больше будет ценить звуки морских обитателей, нарушающие зловещую тишину черных морских пучин.

Теперь впору поговорить о более сложных звуковых сигналах в животном мире, сигналах, связанных с приемом отраженного эха. Здесь орнитологи и зоологи, исследующие надводную фауну, опередили, в силу естественных причин, морских биоакустиков. Уже достаточно давно было показано, что летучие мыши пользуются эхолокационным аппаратом для поиска пищи в вечернее время. Позже были установлены количественные характеристики локационных сигналов различных семейств летучих мышей — подковоносов, ушанов, длиннокрылов, нетопырей, трубконосов. У последних частота заполнения сигналов наибольшая, она достигает 160 килогерц, то есть почти в десять раз превышает верхнюю граничную частоту области слышимости человеческого уха. При этой частоте длина звуковой волны в воздухе не превышает 2 миллиметров, поэтому летучая мышь способна обнаруживать насекомых совсем малых размеров.

Энтомологи долгое время не обращали внимания на то, что тела бабочек, на которых охотятся летучие мыши, покрыты волосками. Оказалось, что этот волосистой покров в определенной степени поглощает высокочастотные ультразвуковые сигналы охотящихся летучих мышей, и последним труднее обнаружить свою добычу.

Дальше — больше. Совсем недавно обнаружили, что существуют виды бабочек, которые могут испускать сигналы той же частоты, что и ведущие поиск летучие мыши. Своими помехами бабочки сбивают преследователей с курса. Как не вспомнить системы активных помех радио- и гидролокационным станциям. Человек был уверен в своем приоритете в области активной радио- и гидролокационной защиты самолетов и кораблей, но природа в лице маленьких бабочек опередила его.

Некоторые другие птицы — стрижи-саланганы, тиниственные гуачаро (южно-американский козодой) также обладают способностью к эхолокации. Их эхолокационный аппарат не столь совершенен, как у летучих мышей, но все же позволяет им ориентироваться в пространстве. Для стрижей это важно ввиду большой скорости полета, а для гуачаро, оби-

тающего в пещерах,— из-за трудности перемещения в вечной темноте.

И, наконец, дельфины. С точки зрения «живой эхолокации» это, несомненно, венец природы. Они способны «автоматически» уменьшать продолжительность сигналов (посылок) и интервалы между сигналами при приближении к цели, что содействует точному наведению на нее. Жировая подушка и выемка соответствующей формы в передней части головы образуют линзу — концентратор излучаемой звуковой энергии, причем сектор, в котором излучаются и принимаются звуковые сигналы, может меняться. Частотная модуляция сигнала позволяет дельфину «отстроиться от помех» и облегчает распознавание особенностей отражающего объекта.

Дельфины могут с помощью эхолокации оценивать форму отражающих тел, его размеры (с точностью до нескольких миллиметров), степень отражения звука от него. Их локатор — многоцелевой, то есть если в локационном поле дельфина находится несколько отражающих объектов, то все они фиксируются. Некоторые исследователи приписывают дельфину способность сканирования пространства звуковым пучком, то есть как бы построчного считывания эхолокационной картины на довольно далеком расстоянии впереди. Следует, однако, признать, что успехи в детальном познании аппарата живой подводной локации все же оставляют желать лучшего.

В последнее время появились сведения, что дельфины (а также кашалоты) могут использовать свой достаточно мощный звукоизлучатель не только для обнаружения, но и для оглушения или даже умерщвления рыб, служащих им пищей.

Несомненно, существуют и рыбы, обладающие способностью к эхолокации, лишь несовершенство техники глубинного лова, а также малый уровень звуковых сигналов рыб не позволяет пока обнаружить их. Зато в научной печати появилось сообщение об эхолокационных сигналах золотоволосого пингвина, который, подобно дельфинам, применяет их для поиска пищи.

Еще несколько десятилетий назад биоакустика представляла собой как бы архипелаг отдельных островков знаний. Сейчас она развилась в сложную, технически вооруженную область биологии и бионики. Дальнейшее изучение голосов птиц, животных, рыб

укрепит в человеке уважение к «малым сим», будет содействовать сохранению мира живой природы.

Наше короткое повествование о мире звуков подошло к концу. Быть может, не у каждого читателя оно пробудит в полной мере чувство восхищения перед всем, что достойно удивления в этом мире. Но, несомненно, никто не откажет акустике в многообразии ее проявлений, в широких возможностях ее применения. А это уже служит залогом дальнейшего развития интереса к данной области науки и техники.

РЕКОМЕНДУЕМ ПРОЧЕСТЬ

Айрапетьянц Э. Ш., Константинов А. И. Эхолокация в природе. Л.: Наука, 1974.

Андреева-Галанина Е. Ц., Алексеев С. И., Кадыскин А. В., Суворов Г. А. Шум и шумовая болезнь. Л.: Медицина, 1972. Биоакустика. М.: Высшая школа, 1975.

Бишоп Р. Колебания/Пер. с англ. М.: Наука, 1970.

Бреховских Л. М., Житковский Ю. Ю. Акустика океана. М.: Знание, 1977.

Брэгг У. Мир света. Мир звука/Пер. с англ. М.: Наука, 1967.

Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985.

Галеев Б. Светомузыка: становление и сущность нового искусства. Казань: Татарское книжное изд-во, 1976.

Глекин Г. В. Николай Николаевич Андреев (Об основоположнике советской акустики). М.: Наука, 1980.

Голубков А. Д. Гидролокатор дельфина. Л.: Судостроение, 1977.

Грегуш П. Звуковидение. М.: Мир, 1982.

Гриффин Д. Эхо в жизни людей и животных/Пер. с англ. М.: Физматгиз, 1961.

Иофе В. К., Мясникова Е. Н., Соколова Е. С. Сергей Яковлевич Соколов (О создателе ультразвуковой дефектоскопии и микроскопии). М.: Наука, 1976.

Каганов М. И. Электроны, фононы, магноны. М.: Наука, 1974.

Карлов Л. Б., Шошков Е. Н. Гидроакустика в военном деле. М.: Воениздат, 1963.

Клюкин И. И., Мясникова Е. Н. Лев Леонидович Мясников (Об одном из основоположников советской школы акустиков). Л.: Наука, 1979.

Клюкин И. И. Звук и море. Л.: Судостроение, 1984.

Клюкин И. И., Шошков Е. Н. Константин Васильевич Шиловский (Об изобретателе гидролокатора). Л.: Наука, 1984.

Лилли Д. Человек и дельфин/Пер. с англ. М.: Мир, 1965. Морская биоакустика. Сборник статей/Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1969.

Мясников Л. Л. Неслышимый звук. Л.: Судостроение, 1967.

Простаков А. Л. Гидроакустические средства флота. М.: Воениздат, 1974.

Простаков А. Л. Электронный ключ к океану. Гидроакустическая техника сегодня. Л.: Судостроение, 1978.

Протасов В. Р. Биоакустика рыб. М.: Наука, 1965.

Рейхардт В. Акустика общественных зданий. М.: Стройиздат, 1984.

Томилин А. Г. В мире китов и дельфинов. М.: Знание, 1980.

Тэйлор Р. Шум/Пер. с англ. М.: Мир, 1978.

Хорбенко И. Г. Ультразвук в машиностроении. М.: Машиностроение, 1974.

Чедд Г. Звук/Пер. с англ. М.: Мир, 1975.

Чернов А. А. Гомо акватикус. М.: Молодая гвардия, 1968.

УКАЗАТЕЛЬ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОВ

Акустооптика — область физики, изучающая явления взаимодействия электромагнитных волн со звуковыми и область техники, в которой создаются различные приборы на основе этих явлений, например модуляторы, фильтры, сканирующие устройства.

Акустоэлектроника — раздел акустики и радиотехники, в задачи которого входит создание устройства для преобразования сигналов (задержку, изменение их частоты и фазы, кодирование и т. п.).

Голография акустическая — интерференционный способ получения объемного изображения предметов с помощью акустических волн. Так как акустические приемники преимущественно линейны (а не квадратичны, как в оптике), то акустические голографические устройства, как правило, проще устройств оптической голографии.

Дефектоскоп ультразвуковой — устройство для неразрушающего контроля изделий и материалов с целью обнаружения в них дефектов (раковин, трещин и др.). Действие его основано на частичном отражении и рассеянии звуковых волн неоднородностями.

Децибел (дБ) — единица уровня звукового давления; 1 дБ — уровень звукового давления p , для которого выполня-

ется соотношение $20 \lg (p/p_0)=1$, где p_0 — пороговое звуковое давление, равное $2 \cdot 10^{-5}$ Па [Паскаль (Па) — давление, при котором сила в 1 Н (Ньютон) равномерно распределена по площади 1 м^2]. В децибелах также измеряются разности уровней звукового давления, интенсивности, мощности звука.

Дифракция звука — отклонение поведения звука от законов геометрической акустики, связанное с неоднородностями в среде, в которой распространяется звуковая волна. Вследствие дифракции звук может огибать препятствия, попадать в область геометрической тени, концентрироваться на отверстиях в экране и т. п.

Диффузный звук — рассеянный звук, в частности, вследствие большого числа отражений от границ. У диффузного звука различные углы падения звуковых волн на ограждение помещения практически равновероятны.

Импеданс — акустический (механический) — отношение звукового давления (механической вынуждающей силы), действующего на элемент среды (тела), к вызванной этим воздействием колебательной скорости частиц (виброскорости).

Интерференция — сложение в пространстве двух или нескольких волн, при котором в разных его точках возникает усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

Интерферометр — измерительный прибор, действие которого основано на явлении интерференции волн. Акустический интерферометр позволяет определять частотные зависимости скорости звука материалов, коэффициентов их звукопоглощения, визуализировать картину колебаний структур.

Кавитация — возникновение в жидкости под влиянием интенсивных переменных давлений (например, при работе гребного винта судна) пузырьков газа или пара. Пузырьки захлопываются в полупериоды сжатия среды, вызывая тем самым мощные звуки, а также повреждения или разрушения сопредельных конструкций.

Оптоакустика — область акустики, изучающая методы возбуждения акустических колебаний электромагнитными источниками (лазерами) и происходящие при этом эффекты.

Реверберация — процесс постепенного затухания звука в помещениях, твердых телах, водных объемах (морская реверберация) после прекращения действия источника звука.

Резонатор — колебательная система, способная совершать колебания большой амплитуды (резонировать) при воздействии внешней силы определенной частоты. Характерная особенность акустического резонатора — сосуда или конструктивного объема с узким горлышком в том, что длина волны его собственных резонансных колебаний значительно больше размеров резонатора.

Рефракция — искривление звуковых лучей в неоднородной среде (атмосфера, океан), скорость звука в которой за-

висит от координат. Звуковые лучи изгибаются в сторону слоя с меньшей скоростью звука; рефракция выражена тем сильнее, чем больше пространственный градиент скорости звука.

Тюнер — блок настройки в электроакустическом тракте.

Фон — единица уровня громкости звука. Определяется по частотным кривым равной громкости звуков. При частоте 1 кГц уровни громкости звука приняты равными уровням звукового давления (уровням интенсивности), отсчитываемым в децибелах над нулевым порогом. Форма частотных кривых равной громкости указывает на то, что при низких и высоких звуковых частотах чувствительность уха меньше, чем при средних частотах. При высоких уровнях звукового давления зависимость уровня громкости от частоты ослабляется.

Фонон — квазичастица, квант энергии звуковой волны, определяемый по аналогии со световыми квантами — фотонами. Квантовые свойства звуковых волн в кристаллах проявляются в том, что существует наименьшая порция энергии колебаний атомов и молекул кристаллов с данной частотой.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (3)

ЧАСТЬ 1.

Физическая и техническая акустика

От истоков акустики к нашим дням — 5. Звуки в воздухе — 11. Звуки в земле — 15. Звуки в воде — 20. Звуки в космосе? — 30. Звуковая энергия ушла, а громкость звука возросла?? — 33. Когда резонатор усиливает и когда ослабляет звук — 37. Что взять для изоляции звука: ватное одеяло или кровельное железо? — 43. Отверстия и щели — воронки для звука — 48. Взаимность — да, взаимовлияние — нет — 52. „Эти в бархат ушедшие звуки“ — 54. Диффузный звук — „акустический мост“ в помещениях — 59. Как задержать вибрацию и удары — 61. Колебания встречаются с трением — 69. Есть ли что-нибудь не поющее в мире? — 74. Победное шествие ультразвука — 83. Кому могла бы понадобиться „акустическая голова“? Расцвет электроакустики — 90. Телефон с оторванной трубкой — 94. „Машина, ответь мне голосом человечьим!“ — 96. От дымовых фигур до акустической голографии — 98. „Перекрестные“ колебательные эффекты. Квантовая акустика — 103.

ЧАСТЬ 2.

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

Миллионы укладываются в десятки — 109. Островок слышимости в океане невоспринимаемых звуков — 114. Зрение или слух (и речь)? — 117. Еще немного о слухе — 119. Удивительный мир звука превращается в угрожающий мир звука — 125. „Спасите наши уши!“ — 131. Новая опасность ползет из глухого угла — 136. О звуковой смерти, которая радуется моряков — 141. Откуда взялась у человека „утиная речь“? — 144. Музыка радующая и музыка работающая — 146. Музыка лечащая и музыка калечащая — 152. Болтливый „мир безмолвия“. Два слова об эхолокации в природе — 156. Рекомендуем прочесть — 163. Указатель некоторых терминов — 164.

СЕРИЯ «НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА»

●
Игорь Иванович Клюкин

●
УДИВИТЕЛЬНЫЙ МИР ЗВУКА

Заведующий редакцией Ю. И. Смирнов
Редактор Л. А. Алиева
Художественный редактор О. П. Андреев
Рисунки художника Г. В. Носкова
Технический редактор А. И. Казаков
Корректоры С. Н. Маковская, Е. П. Смирнова

ИБ № 1200

Сдано на фотонабор 15.08.85. Подписано к печати 26.03.86.
М-23496. Формат 84×108 1/32. Бумага типографская № 2.
Гарнитура журнально-рублиная. Печать высокая. Усл. печ.
л. 8,82. Усл. кр.-отт. 9,14. Уч.-изд. л. 8,5. Тираж 76 000 экз.
Заказ № 684. Изд. № 3998—84. Цена 30 к.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ор-
дена Трудового Красного Знамени Ленинградского объеди-
нения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзпо-
лиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам
издательства, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ле-
нинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.

Удивительный мир звука

От истоков акустики к нашим дням.

Звуковая энергия ушла, а громкость звука возросла.

Когда резонатор усиливает и когда ослабляет звук.

Отверстия и щели — воронки для звука.

Диффузный звук — „акустический мост“
в помещениях.

Победное шествие ультразвука.

Островок слышимости в океане невоспринимаемых
звуков.

Удивительный мир звука превращается в угрожа-
ющий мир звука.

„Спасите наши уши“.

О звуковой смерти, которая радует моряков.

Музыка лечащая и музыка калечащая.

Болтливый „мир безмолвия“. Эхолокация в природе.