

# Клюкин И И

## Удивительный мир звука

И.И.Клюкин

Удивительный мир звука

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

В книге в научно популярной форме описаны разнообразные акустические явления, происходящие в водной среде. Рассмотрены области применения современной акустики и возможности их дальнейшего расширения.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

### СОДЕРЖАНИЕ

От автора (3)

#### \* ЧАСТЬ 1. ФИЗИЧЕСКАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА \*

Звуки в воздухе (5). Звуки в земле (10). Звуки в воде (16). Звуки в космосе (27). Звуковая энергия ушла, а громкость звука возросла?? (31). Когда резонатор усиливает и когда ослабляет звук (35). Что взять для изоляции звука: ватное одеяло или кровельное железо? (41). Возможно ли подслушивание через замочную скважину? (47). "Эти в бархат ушедшие звуки" (52). Как задержать вибрацию и удары (58). Колебания встречаются с трением (69). Есть ли что-нибудь не поощее в мире? (75). Победное шествие ультразвука (82). От дымовых фигур до акустической голографии (89). "Перекрестные" колебательные эффекты. Квантовая акустика (96).

#### \* ЧАСТЬ 2. ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА \*

Миллионы укладываются в десятки (102). Островок слышимости в океане невоспринимаемых звуков (108). Зрение или слух (и речь)? (112). Еще немного о слухе (114). Удивительный мир звука превращается в угрожающий мир звука (120). "Спасите наши уши!" (128). Новая опасность ползет из глухого угла (133). Когда звук убивает наверняка (139). Откуда взялась у человека "утиная речь"? (142). Светомузыка и музыкопоя (145). Болтливый "мир безмолвия". Эхо-локация в природе (153). Литература по акустике для массового читателя (161).

### ОТ АВТОРА

Во всех упругих средах и телах могут возникать механические (акустические) колебания. Они сопровождаются интереснейшими физическими и иногда физиологическими явлениями.

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.

Из этой книги читатель узнает о парадоксах действий с акустическими логарифмическими единицами и о 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 ультразвуковая дефектоскопия металлов и ультразвуковая технология обработки, гидроакустическое эхолотирование и телеметрия, борьба с обрастанием судов акустическими методами? Зачем нужна акванавту "гелиевая речь" и каковы ее особенности? 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 колебаниями трубок паровых котлов, не повинен ли инфразвук в появлении "летучих голландцев"? Обо всех этих и многих других вопросах узнает читатель.

Отзывы и пожелания будут приняты с благодарностью. Их следует направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство "Судоостроение".

\* ЧАСТЬ 1 \*

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

Р. Бишоп

ФИЗИЧЕСКАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

ЗВУКИ В ВОЗДУХЕ

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

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, средство защиты от губительных космических излучений, но и как звукопровод, позволяющий людям вести речевую связь, воспринимать сигналы опасности, информацию о местонахождении и перемещениях живых и неживых объектов, следить за изменением их состояния, за многими природными явлениями.

Неудивительно поэтому, что человечество с давних времен стремилось среди прочих свойств атмосферы познать ее акустические свойства. Доступными каждому средствами, путем наблюдения разницы во времени между появлением молнии и звуком грома оценили, что скорость распространения звука в воздухе относительно невелика. В начале XVIII века Ньютон выводит формулу, согласно которой скорость звука в газе равна корню квадратному из отношения статического давления газа к его плотности. Лаплас дополнил ее поправкой на теплоемкость среды. Точное 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 -- порядка 1,5 километра в секунду, в металлах-- примерно 5 километров в секунду, а в породах земной мантии -- 8 километров в секунду и более.

В наше время развернуты в больших масштабах исследования как акустических свойств атмосферы, так и иных ее свойств 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 другим же данным, достигают 400-- 500 герц. Сила звука, то есть количество звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади фронта волны, в 1015 и более раз превышает силу звука человеческого голоса. Подобные звуковые энергии зарегистрированы еще лишь при сильных извержениях вулканов, да, быть может, в непосредственной близости от мощнейших ракетных двигателей. При ядерных взрывах, несомненно, возможны 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 всего 3--4 года 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 14000 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 и теория шумового кольца.

Другие исследователи обнаружили резонансное взаимодействие различных звуковых волн, распространяющихся в атмосфере. Оно также носит нелинейный характер и проявляется на частотах до нескольких десятков герц. Довольно причудливую зависимость от частоты звука и высоты его распространения в атмосфере имеют величины километического 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 во многие тысячи раз превышает рассеяние электромагнитных колебаний. Так родилось новое направление исследования тропосферы -- ее акустическое зондирование, или акустическая эхо-локация.

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

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

Записи этих эхо очень наглядны, иногда прослеживаются несколько находящихся один над другим неоднородных слоев в атмосфере. 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 флуктуации температуры атмосферы на различных высотах.

Звуку в атмосфере сейчас находят все больше применений, а ведь до второй мировой войны единственным его назначением считалась пассивная локация самолетов и артиллерийских батарей. Для этих целей были созданы весьма совершенные приборы. Определение местоположения батарей по звукам выстрелов не снято с повестки дня (ведь батареи не могут быстро перемещаться с места на место). А вот звуколокация самолетов по мере приближения их к звуковому барьеру постепенно утратила свое значение. Уже

упоминалось, что звук в воздухе -- "неторопыга" в сравнении, например, с электромагнитными волнами, и звуколокатор не успевал следить за перемещением самолетов. Радиолокация здесь постепенно вытеснила звуковую технику.

Казалось бы, последней уже нет возврата в область слежения за скоростными объектами. Казалось бы... Но вот в журнале Американского акустического общества за 1966 год появляется статья об успешном звуковом определении конечных точек траектории и мест приземления вертикально падающих сверхзвуковых ракет. Дело в данном случае именно в том, что определяется траектория не пролетающего тела, а тела, заканчивающего свой путь в пространстве. Используется мощная ударная волна сжатия, конусом распространяющаяся в воздухе от головной части ракеты. Для улавливания ее служит база всего лишь из четырех микрофонов, расположенных по углам квадрата, и счетно-решающего устройства.

Такая аппаратура, конечно, значительно проще и дешевле специальной радиолокационной аппаратуры слежения.

Так что аэроакустическая техника не отжила свой век; несомненно, найдутся новые области ее практического применения и будут вскрыты многие не известные нам 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.

Свое "военное" назначение акустика сохраняет и теперь, но техника существенно усовершенствовалась. Некая английская фирма сообщила недавно, что ею разработан сейсмометрический прибор "Гобиаз" для распознавания присутствия движущихся тяжелых машин в радиусе до 15 километров. По заверению фирмы, прибор может отличить шум гусеничных машин от шума колесных машин. На более близких расстояниях он "слышит" также шаги человека и животных.

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 фиксируются многие тысячи 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 производит осмотр моста.

Итак, первое по времени возникновения направление подземной акустики -- подслушивание кого-либо или чего-либо, представляющего опасность, -- было, есть и, надо полагать, останется на службе человека на вечные времена, разумеется, постоянно развиваясь и совершенствуясь. Но уже 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 удаленных от первой, принимают 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

жидкостных 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 и некоторые другие признаки, удастся по записям геофонов 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

Впечатляющи результаты сейсмических исследований в Антарктиде. За какой-нибудь десяток-полтора лет изучены структура ее ледяного панциря и рельеф материка подо льдом. Средняя толщина льда в Антарктиде оказалась около 2 километров, а максимальная -- более 4 километров. Подо льдом обнаружены крупные горные цепи с высотами до 3 километров, а также более чем километровые 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 и разведки нефтяных и газовых месторождений, картирования при поисках каменного угля, железной руды и россыпных месторождений. Применение звуковой геолокации 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 карту глубинных слоев в требуемом 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.

Чисто акустическое эхозондирование (т. е. зондирование, при котором акустическая энергия сигналов в среде не переходит в другие виды энергии), в общем, уже не новость. Но лишь совсем недавно обнаружена возможность комбинированного зондирования пород в земной среде. "Камни заговорили", "говорящие сокровища", -- как на сенсацию, реагировали журналисты на это открытие ученых Института физики Земли АН СССР М. П. Воларович и Э. И. Пархоменко.

Пьезоэлектрический эффект таких минералов и веществ, как кварц, турмалин, сегнетова соль, титанат бария, давно используется в технике. Но вот оказалось, что ряд горных пород -- кварциты, гнейсы и даже тривиальные граниты -- способен откликаться электромагнитной волной на упругую волну взрыва. Для улавливания этой ответной электромагнитной волны служат простейшие приемники -- металлические стержни, вставленные в землю. Индуцированный в стержнях электрический ток подводится к усилительному устройству, связанному с самописцем.

Кварциты часто являются золотоносными, и, таким образом, акустико-электромагнитное зондирование дает ориентир первичного поиска золотоискателям.

Но и 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 и как скоро в том или ином месте котлована 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.

Соледобытчики, использующие в своей работе метод подземного выщелачивания, теми же звуколокационными приборами определяют размеры и конфигурацию соледержащих включений, размеры пустот и камер, остающихся после изъятия соли с помощью поверхностных "соляных фонтанов".

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 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 обратили на шахты Донбасса, где уже тогда угледобыча производилась на глубинах до полукилометра. В настоящее же 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 акустических 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 одинаков. 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 уже никто не верил. Он ответил

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

Какова же она сейчас? Накопленный опыт, использование разработанной горными акустикой системы статистических критериев повысили надежность текущего сейсмоакустического прогнозирования опасности динамических явлений в шахтах до 95--98%. 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 прогноза подземных динамических явлений начали работать в шахтах Донбасса с 1965 года. В первый же год введения служб количество

неожиданных динамических явлений сократилось в 3,5 раза, а через 5 лет -- в 20 раз, хотя в этот период протяженность вибросоопасных зон в шахтах увеличилась вдвое вследствие перехода выработок на нижележащие горизонты.

В г.Прокопьевске (Кемеровская область) группа ученых под руководством П. В. Егорова работает над тем, как на основании акустического прогнозирования вести разработки угля, чтобы уменьшить вероятность "горного удара".

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 того, 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 1912 году относится изобретение К. В. Шиловским и П. Ланжевром 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 книжке, 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. 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 мнемоническое 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, вновь и вновь приходит к ней, постепенно затухая по мере удаления от источника звука.

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

Траектория его напоминает цепь, подвешенную во многих местах к буйкам на

поверхности моря. Условия для подводного обнаружения звука в поверхностных слоях при этом достаточно хорошие.

В летнее время, когда более холодными являются глубинные слои воды, 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 вверх. 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 акустическими, а в глубоком море (Черном)--советскими учеными Л. М. Бреховских и Л. А. Розенбергом.

За эту работу они удостоены Государственной премии СССР.

Были отмечены случаи распространения звука взрыва небольшой бомбы по подводному звуковому каналу от берега Австралии до Бермудских островов, то есть на расстоянии, равном половине окружности Земли. Существуют карты глубин залегания устойчивого звукового канала в океанах. Как правило, эти глубины в северных районах меньше, чем в южных. Так, на широте  $10^\circ$  в районе Маршалловых островов глубина залегания канала близка к 1 километру, а в районе Алеутских островов она не превышает 100 метров. Но 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 отражениями от каменистого дна. Реверберация иногда является серьезной помехой рыболокации и военно-морской гидролокации, так как она может маскировать принимаемый полезный эхо-сигнал.

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 реверберация 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 известно было, 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 теории 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, как "тривиальные" помехи от шумов морского волнения, а также 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: 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 отлично отражают звук, причем в значительно большей мере, чем его отражает, 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 различных организмов -- от микроскопического биопланктона до медуз и даже более крупных существ.

Однако, кто бы ни были их "учредители", со звукорассеивающими слоями приходится считаться военно-морским акустиком, 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, 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, Н. А. Грубником, Ф. И. Кряжевным, В. Ильичевым, Ю. П. Лысановым и многими другими. В последние годы 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 великого физика Рэлея.

Интересен анализ процесса 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 эхо-локации выполнены в последнее время А. А. Клещевым, 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 и 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, где находилась немецкая школа подводного плавания, вышел в Киль под усиленным конвоем самый большой немецкий лайнер "Вильгельм Густлов"

водоизмещением 25 тысяч тонн. На нем находилось четыре тысячи высококвалифицированных подводников, которых уже ждали в Киле, чтобы укомплектовать ими 70 подводных лодок. Всего же на корабль набилось более шести тысяч человек.

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. Шнапцев доложил о далеком шуме винтов и указал пеленг на группу кораблей. Маринеско применил дерзкий маневр: он зашел со стороны берега и выпустил четыре торпеды по главной цели, теперь уже отчетливо выделявшейся 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, в Берлине же во второй раз за время войны был объявлен трехдневный траур (первый раз это было после разгрома фашистских войск под Сталинградом). В эфир пошло сообщение, что командир С-13 объявлен "личным врагом Германии".

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 еще один громадный транспорт -- "Генерал Штойбен". Из находившихся на его борту 3600 солдат и офицеров спаслось менее трехсот. Найти в кромешной мгле и отправить на дно моря два гигантских 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 станций увеличилась во много раз. Была освоена пассивная и активная 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 наибольшая, и легче обнаружить объект, снабженный защитными средствами.

Развертываются глобальные гидроакустические системы. Одна из них под зловещим названием "Морской паук" должна обеспечивать 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.

Но, пожалуй, еще более властно заявляет о себе мирная гидроакустика. Применения ее до невероятности многообразны и становятся все более связаны с бурным 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. А вот эхолоты-картографы с автоматической цифровой отметкой глубин на карте еще только начинают внедряться на гидрографические суда.

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 эхо-локационные 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 хорошо известны. Кажется, совсем недавно автор описывал в одной из книг живописную выставку "Инрыбпром-68" в Ленинграде. Прошло семь лет, и вот опять западная стрелка Васильевского острова была окружена множеством ослепительно белых рыболовецких судов всех стран, и флаги их вместе с флагами расцвечивания трепетали над вместительными павильонами. Особенно интересная гидроакустическая поисковая техника на "Инрыбпроме-75" демонстрировалась в советском, японском и немецком разделах выставки. 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, т.е. на глубинах в несколько сот метров. Первенцем подводного бурения дна в открытом море было судно "Гломар Челленджер"; сейчас таких судов насчитываются десятки.

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 над ней пауком. Приводится в действие гидролокационное устройство, находящееся на конце колонки. На дальних расстояниях 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 теперь насчитывается великое множество. Связываются они между собой и с обеспечивающими надводными судами с помощью гидроакустического телефона, определяют рельеф дна и его глубинную структуру с помощью гидролокационных "щупалец".

Больше всего при освоении Мирового океана ученых 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 насущные проблемы, которые следует разрешить. Мы на пороге новой эры, эры поисков и исследований!"

Гидроакустические методы и приборы займут в этих поисках достойное место.

**ЗВУКИ В КОСМОСЕ?**

Мы услышим полет всех планет..

А.Блок

-- Акустика 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 солидной высоте 188 километров, где, казалось бы, плотность атмосферы ничтожна (в 109 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 описывал 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 ракет 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.

На космических снарядах, в условиях невесомости, будут, как известно, получать новые 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. Как не заявить, если уже сейчас в некоторых странах разрабатываются проекты лунных городков на сотни и тысячи человек.

Прибор, установленный на поверхности Луны, передает по радио на Землю сведения о затухании звука в лунных породах.

А что делается снаружи космического корабля, непосредственно вблизи 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 интереснейшее открытие: время реверберации (послезвучания) колебаний в породах лунного грунта приближается к минуте. Луна звучит, как церковный колокол! Пока еще не дано объяснения этому явлению.

Была измерена и 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 курьезе, они сообщили, 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 звуковое, 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 различающимися акустическими сопротивлениями.

Хотя мы не хотели 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:

$$J=0,5p^2/Z=0,5v^2Z$$

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 и 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 уж 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 перевоплотившийся в звуковую волну (почему бы и 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 стену 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 давления, а, например, не звуковой энергии. Таким образом, дан ответ на одну из частей заголовка главы, хотя можно признать, пожалуй, что ничего особенно удивительного мы пока еще не узрели.

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 проходит 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 ныряльщики 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  $13^\circ$  происходит полное отражение звука от поверхности воды.

Рассмотрим еще, хотя бы для контраста, что делается на границе рассматриваемой среды с другим параметром колебательного процесса - колебательной скоростью частиц. На это даст ответ средняя часть второй формулы. Поскольку в среду передалась ничтожная часть звуковой энергии, а акустическое сопротивление среды весьма велико, это может быть лишь при ничтожной колебательной скорости, значение которой в правой части формулы входит множителем в выражение акустического сопротивления.

И здесь можно провести аналогию с мечущимся по комнате лектором. При всем желании он не в состоянии раскатать ногой кирпичную стену, то есть колебательная скорость во второй среде близка к нулю.

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?

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.

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. Вот почему до нас не доносится в воздухе звук от удара одного камня о другой (хотя ныряльщик, проделывающий это, сам

слышит довольно интенсивный шум, несмотря даже на изолирующие воздушные пробки в ушах),

А что же наш демонстратор, может ли он предложить для этого случая какую-либо "мнемоническую модель"? Если он прикрепит вертикально к ножкам стола лист плотной бумаги (которая в данном случае будет изображать первую среду -- с большим акустическим сопротивлением) и его нога, по-прежнему представляющая звуковую волну, прорвет этот лист, то ясно, что скорость ноги в момент прорыва возрастет, но поскольку за листом нога встречает воздушную среду, не оказывающую никакого сопротивления, то нет и условий для возникновения давления в этой среде.

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, свойственных 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 1905 года утром в день предстоявшего заседания II 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 и 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. Лишь на частоте резонанса эти взаимно противодействующие сопротивления таинственным для непосвященного образом "съедают" друг друга (совсем как сказочные львы в эпитафии), и остается лишь "хвостик" -- сопротивление трения, которое всегда меньше сопротивления упругости и массы. Амплитуда колебаний системы

увеличивается во много раз, что и может привести к печальным последствиям.

О явлениях резонанса в механических системах уже говорилось выше. 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 резонатора 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 осуществления 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 увеличить поглощение в акустическом резонаторе с целью ослабления звука вблизи резонатора. Так родилось новое направление в теории и технике звукопоглощения -- резонансное звукопоглощение.

Целый ряд ученых в разных странах 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. 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 менять, 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, заглушать колебания на этих частотах, но иногда зал сам по себе оказывается заглушенным в той или иной области частот; для более полного звучания музыки, вокальной 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, даже, наконец, целые помещения, -- все это как-то еще соотносится 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 великого физика Рэля, 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 Рэля, 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.

В последнее время румынский ученый Грумезэску много занимался вопросами взаимодействия резонирующих систем со звуковым полем. Плодом работ Грумезэску явился прочитанный им на одном из последних конгрессов по акустике пространственный доклад, название которого мы почти дословно повторили в заголовке этого раздела. Из доклада читатель может узнать еще и о других интересных примерах усиления и поглощения звука различными резонаторами,

**ЧТО ВЗЯТЬ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ЗВУКА:**

**ВАТНОЕ ОДЕЯЛО ИЛИ КРОВЕЛЬНОЕ ЖЕЛЕЗО?**

Тебе удивляться нисколько не надо,

Что сквозь преграды, глазам

ничего не дающие видеть,

Звуки доходят до нас и

касаются нашего слуха.

Лукреции Кар. О природе вещей Кн.4  
Массу стенки увеличим в  
десять раз -  
Втрое-вчетверо шум снизится у нас  
(Предлагается в качестве хороводной )

Раскроем цитированное в эпиграфе творение римского философа-материалиста и писателя Лукреция, Если извлечь из этого творения все высказывания, касающиеся звука, то можно из них одних составить небольшую, но полную интересных наблюдений книгу по акустике. И приведенное нами извлечение как бы убеждает читателя: да, не нужно удивляться, даже каменные стены могут пропускать звук.

До поры до времени человечество как-то мирилось с этим. Но по мере роста "акустической загрязненности" среды, увы, неизменно сопутствующего развитию цивилизации, усилилась необходимость исследовать процесс прохождения звука через различные ограждения и научиться по возможности препятствовать этому процессу.

Интуитивно можно было предполагать, что в явлении изоляции, то есть "непропускания", звука значительную роль играет масса любой строительной конструкции -- стенки, пола и т. п. А. Шох дал этому строгое доказательство. Но одно дело физические величины-- звуковое давление, звуковая энергия, проходящие через стенку, и совсем другое дело -- имеющий при этом место физиологический эффект, т.е. снижение ощущения громкости шума за стенкой. Во второй части книги физиологической акустике будет уделено достаточное внимание, здесь же мы отметим лишь, что при учете снижения громкости 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 стенка (скажем, масса ее на единицу площади не превышает 1 килограмма на квадратный метр), и мы, с целью увеличения звукоизоляции, заменим ее вдесятеро более тяжелой стенкой, т. е. с удельной 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 вот беда, оказалось, что это уменьшение громкости недостаточно и надо уменьшить ее, скажем, еще во столько же раз. Потребуется, следуя логарифмическому закону, увеличить массу стенки опять в 10 раз, т. е. с 10 до 100 килограммов на квадратный метр.

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

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. Впрочем, 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 наблюдали 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 рассмот

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.

рении 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" увеличивает звукоизоляцию. Но с другой стороны, поскольку при этом уменьшается отношение массы стенки к ее изгибной жесткости, ухудшающий звукоизоляцию резонанс совпадения проявляется на более низких частотах и захватывает более широкую полосу частот.

Где выход? Тот же Л. Кремер предложил делать тонкие пропилы в стенках на определенную глубину. Не изменяя практически массу стенки, эти пропилы резко уменьшают ее жесткость, и частота резонанса совпадения перемещается в более высокую область частот. У свинцовых же звукоизолирующих перегородок, например, 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 удается 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 и что больше определенной величины этот зазор делать не следует, иначе резонансы будут возникать с более низких частот и захватят более широкую их область. Опыт показал, что при наличии в зазоре звукопоглощающих материалов бояться этих резонансов нечего.

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 обеспечивала звукоизоляцию до 80 децибелов, 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 конструкциях полов) исследовались ведущими советскими строительными акустиками С. П. Алексеевым, И. И. Боголеповым, В. И. Заборовым, С. Д. Ковригиным, М. С. Седовым и другими, во многом содействовавшими внедрению эффективных звукоизолирующих конструкций в строительстве, на производстве и на транспорте.

#### 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, что человек, находящийся в одной комнате с говорящим (но, естественно, в известном отдалении от него, скажем, у стены вблизи двери), уже не в состоянии эту речь отчетливо воспринять.

В самом общем виде дифракцию волн можно определить как явление взаимодействия волн с каким-либо препятствием, находящимся на пути их распространения. Следствием такого 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 как бы 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 эффективной площади отверстия вследствие дифракции достигает шести на частоте 1200 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 последует, 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, т.е. 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 и тогда при звукопроводности створки 1/100 через щель пройдет всего лишь в 4 раза меньше звуковой 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? У начальников различных рангов часто пользуется популярностью обивка дверей, целиком или хотя бы по контуру, войлоком в клеенке.

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

Пушистые ковры на полу и старинные, вышедшие из моды драпри вокруг двери уменьшают отражения 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 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.

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

Повезло судам и кораблям. Двери на них, как правило, герметичные, водонепроницаемые, а значит, и звукопроницаемые. 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 иногда добывают сведения подслушиванием через замочную скважину или неплотно притворенную дверь. Однако вопрос, адресованный специалисту-акустику после беседы о звукопроводности щелей и отверстий, был задан не кумушкой и не разведчиком. Вопрос был такой:

-- А какой голос -- мужской или женский -- легче подслушать?

Вопрос не простой. С одной стороны, в мужском голосе больше составляющих низких звуковых частот, которые в большей степени отражаются ограждениями и обуславливают большую концентрацию звука на отверстиях. Но, с другой стороны, для большей разборчивости (лучшей артикуляции) речи необходимо содержание в ней значительной части составляющих повышенной частоты. Поэтому специалист-акустик признался, что он не может ответить на заданный вопрос.

"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.

Витрувий. Об архитектуре

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

Для достижения большого звукопоглощения должны быть выполнены некоторые условия, в частности, обеспечена достаточная толщина звукопоглотителя (тем большая, чем ниже частота звука), 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 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.

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

Последнее заключение -- еще один пример того, что упрощенно-интуитивные предположения иногда обманывают. В действительности здесь может быть все наоборот. В дело вмешивается принцип нормального импеданса, справедливый для многих звукопоглотителей, в частности, поглотителей звука в воде. 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.

"Необоримый" нормальный импеданс приводит к тому, что в дело вмешивается косинусоидальная зависимость поглощения от угла падения звука: звуковая волна, приходящая к звукопоглотителю вблизи от перпендикуляра к его поверхности, лучше поглощается, чем волны, падающие под косыми углами.

Так ли уж необорим нормальный импеданс? 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 достаточно причудливыми. К подобным же выводам пришли японские ученые, исследовавшие керамические поглотители, применяемые в конструкциях, работающих на открытом воздухе (например, в автотуннелях).

Еще немного физики, прежде чем перейти к практическому применению звукопоглотителей. Уже довольно давно было обнаружено при испытаниях участков звукопоглотителей в измерительных камерах интересное явление. Если определять поглощаемую энергию, по отношению к поверхности, звукопоглотителя, то коэффициент поглощения иногда оказывается больше единицы. Выходит, поглощаемая звуковая энергия больше энергии, падающей на поглотитель? Может быть, нарушается закон сохранения энергии? Нет, конечно, никакого нарушения закона не происходит. Просто вследствие явления дифракции наблюдается эффект, подобный описанному выше "эффекту замочной скважины". Кромки поглотителя, особенно близко расположенные к отражающим поверхностям камеры, "впитывают" звук, чем и обусловлено усиленное звукопоглощение исследуемого образца материала. Это явление было названо "кромочным эффектом".

Но вред от дифракции как источника измерительных ошибок гораздо меньше, чем положительная роль, которую может сыграть та же дифракция в залах, если на их стены и потолки нанесен звукопоглотитель. Участки звукопоглотителя, действуя по принципу замочной скважины, отсасывают на себя звук, отраженный от необлицованных участков ограждений помещения. Значит, вовсе не обязательно покрывать звукопоглотителем всю поверхность помещений! С точки зрения строительной практики это очень важный вывод.

Но вот мы уже подошли и к практическому применению звукопоглотителей. Еще Витрувием было подмечено, что в некоторых гулких залах речь оратора трудно разобрать, хотя громкость ее и достаточна. Здесь на помощь приходят звукопоглощающие облицовки.

Ассортимент их сейчас чрезвычайно разнообразен. Это и маты из минеральной "шерсти", пенополиуретана, и звукопоглощающие штукатурки, и древесностружечные 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 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 и на частотную зависимость времени реверберации.

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 поглощения звука людьми можно сказать, что

звукопоглощение одного человека на средних звуковых частотах близко к поглощению половины квадратного метра открытого окна.

Автор не решился бы в связи с этим остановить внимание читателя на одном замечании (которое может показаться легковесным), если бы оно не принадлежало виднейшему акустику нашего времени Э. Мейеру. В начале 70-х годов английское акустическое общество учредило медаль имени великого физика-акустика Рэля. Как уже говорилось, принимая поднесенную ему первую медаль, Мейер выступил с благодарственным словом, в котором он сначала упомянул о созданном им во время второй мировой войны противогидролокационном звукопоглотителе для немецких подводных лодок. Далее речь приобрела более игривый характер. Прогресс человечества (как, впрочем, и уравнивание прав обоих полов в обществе) он сопоставил с изменением звукопоглощения мужчинами и женщинами. Измерения начала века указывали на большее звукопоглощение женщинами, что было обусловлено их пышными кринолинами и прическами. При переходе женщин к мини-юбкам, коротким стрижкам, а мужчин -- к пышным шевелюрам звукопоглощение представителей обоих полов уравнилось.

От поглощения звука людьми вернемся, однако, к поглощению его в помещениях. 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 вообще не выполняет своей функции. Она отбрасывает звук обратно, не пропускает его в изолируемое помещение. Но если не поглощать возвращаемый звукоизолирующей перегородкой звук, то его уровень в помещении источника будет при непрерывной работе источника все время возрастать (теоретически до бесконечности), 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.

Вряд ли можно было более умело сочетать 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.

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 присутствуют 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 и не представляем себе, какой рев стоял бы здесь, не будь в вентиляционных шахтах тех или иных звукопоглощающих устройств.

При весьма сильных шумах звукопоглотители ведут себя несколько иначе, чем при слабых. И. В. Лебедева, исследовавшая физику звукопоглощения при Жуковых уровнях, близких к порогу болевого ощущения, установила, что большая роль принадлежит нелинейным явлениям, увеличивающим эффект звукопоглощения. Не этим ли 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 от



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, в общем, 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".

#### 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 задерживать 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 одном из первых мест в длинном списке видов 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, недаром сети для ловли тунца располагаются на буксирном тросе на расстоянии многих десятков километров от рыболовного судна.

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. Раньше 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 еще поставлена трехпудовая наковальня!"

Едва ли разгоряченная зрелищем публика отдавала себе в этот момент отчет, что наковальня не только не отягчает страданий атлета, как это старался доказать ведущий, но, напротив, спасает ему жизнь. Главное, нужно было лишь выдержать ее вес, да еще незаметное на глаз перемещение в момент удара.

Это небольшое 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.

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

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

Разложение любого ударного импульса в интеграл Фурье указывает на наличие весьма большого количества частотных составляющих силы, расположенных сколь угодно близко

друг к другу. Применяв же 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.

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 низких частотах возникает резонанс, и колебания даже усиливаются по сравнению с тем, какими они были, когда пружина отсутствовала, Классическая теория

А теперь источником возмущающей силы является механизм с неуравновешенным ротором. Масса, поставленная под механизм на сравнительно жесткое основание, как это ни странно, почти не уменьшает передачу ему колебательной силы.

Установленные между массой и основанием амортизационные пружины ведут себя подобно податливой груди атлета под наковальней. Проявляющиеся при этом инерционные силы массы содействуют ослаблению передачи колебательной силы основанию.

виброизоляции, развитая 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 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" и который прямо указывает, что динамика и акустика твердых тел различаются, по существу, лишь названиями. И недаром дальнейший

прогресс в области изоляции

При жестком основании (фундаменте) отдельно взятые масса и упругость передают основанию всю колебательную 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 усилиться).

колебаний в твердых телах осуществили акустики, в первую очередь советские, немецкие и американские.

Виброизолированной системе -- например, установленному на упругие опоры-амортизаторы виброактивному механизму -- свойственно шесть частот свободных колебаний, сообразно числу степеней свободы. При совпадении их с частотами возмущающих сил или моментов возможны интенсивные резонансные колебания. В нашей стране в области расчета резонансных частот и амплитуд колебаний самых различных систем виброизолирующей амортизации механизмов (колебаний, которые в различных степенях свободы еще и связаны друг с другом) много сделали Н. Г. Беляковский, О. К. Найденко, В. И. Попков.

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 амортизаторов под некоторыми

углами можно не только ликвидировать связь колебаний в различных степенях свободы (это было уже ранее показано авиастроителями), 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 судовой амортизации. 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 амортизаторах. Академик довольно долго дергал за тросики, привязанные в различных частях "механизма", и, убедившись в правильности утверждений, подписал статью в печать. Наклонная амортизация стала применяться на судах.

Конечно, разработка методов расчета колебаний амортизированных механизмов на низких частотах-- это лишь один, в общем, достаточно узкий аспект проблемы виброизоляции. Магистральное направление-- изучение вибропередачи на средних и высоких звуковых частотах, где процесс принимает волновой характер. Были исследованы особенности прохождения колебаний через сложные структуры, содержащие до семи и более элементов (механизм, несколько каскадов виброизоляторов, промежуточные рамы и блоки, фундамент, конструкция за ним). Удалось показать, что на некоторых частотах, при наличии интерференционных явлений в механизме или его частях, вибрация фундамента от действия силы, приложенной на границе упругой прокладки и механизма, может быть меньше, чем от силы, действующей в удаленной от прокладки верхней части механизма (хотя, на первый взгляд, можно ожидать обратного). Впервые было установлено, 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 передаточная функция (перепад) колебательных уровней на амортизаторах, наиболее просто измеряемых на готовой установке амортизации.

В. И. Попков впервые рассчитал и измерил в широком диапазоне звуковых частот колебательную энергию, передаваемую через виброизолирующие крепления.

Выдающийся немецкий акустик Л. Кремер, о котором мы уже говорили, показал разницу в виброизоляции упругими прокладками продольных и изгибных волн. В США интересные работы по виброизоляции были выполнены Кридом, Сноудоном и другими.

Автор перечитал написанное, и ему вдруг подумалось: а не покажутся ли некоторым читателям, особенно молодым, слишком уж "будничными" вопросы вибрации? Ведь нет здесь лучей лазеров, прожигающих на расстоянии стальные листы, миллионноградусных плазменных шнуров, бьющихся в чудовищных магнитных полях. Читатель должен поверить, однако, что радость от обнаружения нового явления или закономерности, игра ума при этом одинаковы, независимо от того, участвуют ли здесь тысячи киловатт мощности, миллионы эрстед, атмосфер или только колебательные движения с амплитудами в доли микрона, сопровождается ли это явление броскими внешними аксессуарами или нет.

Вернемся, однако, к предмету нашего повествования. 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 и 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. Что это -- мистификация или, быть может, невежественная оговорка? Ни то, ни другое. Часто отождествляют 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. 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 (см. график на с. 239 книги И. И. Ключкина "Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах". Изд. 1-е. Л., Судпромгиз, 1961). Резина буквально превращается в дерево, виброизоляция ее падает.

Это обстоятельство, а также необходимость обеспечить надежное крепление механизмов в любом положении, под произвольным углом к горизонту были учтены при разработке резинометаллических амортизаторов 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.

Осваивал производство амортизаторов ленинградский завод "Красный треугольник". 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 тридцать лет назад. С тех пор освоены многие значительно более сложные типы амортизаторов -- пружинно-резиновые, пневматические и другие. Многие конструкции не выдержали "испытания практикой", но первые образцы амортизаторов и сейчас являются одним из самых ходовых изделий этого вида. Их выпущено уже более миллиона, они используются не только на судах, но и на других видах транспорта, в промышленности, жилищном строительстве. Группа амортизаторов различных размеров, поставленных рядом, напоминает семейство слоников, которые когда-то можно было видеть на мещанских комодах. Самые маленькие амортизаторы служат для защиты легких хрупких приборов от сотрясений, самые большие -- для звукоизоляции 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. Виброизолирующие прокладки и амортизаторы являют собой пример отражающей конструкции, действующей вследствие резкого уменьшения сопротивления в месте перехода от металлического вибропровода к резине или иному весьма податливому материалу. Можно применить и другое виброзадерживающее средство, использующее эффект отражения колебаний из-за местного увеличения сопротивления. Это - локальные массы, те же массы, с которых мы начали рассказ о борьбе с вибрацией и ударами.

Весьма часто шум в судовых помещениях обусловлен звуковой вибрацией их ограждений, приходящей 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 удается добиться такого абсолютного скачка сопротивления, а следовательно, и акустического эффекта, как с помощью амортизаторов. Действие местных виброзадерживающих масс и различные аспекты их применения были подвергнуты обстоятельному анализу Л. Кремером и А. С. Никифоровым.

В некоторых случаях скачок сопротивления можно получить, введя линии и цепочки местных 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 вела себя как более или менее широкополосное виброзадерживающее средство. Результаты теории и эксперимента сходились, а вот физический смысл явления оставался неясным.

...Конференции круглого стола бывают не только у дипломатов, но и на собраниях ученых. В 1971 году на такой конференции, входившей в программу VII Международного конгресса по акустике в Будапеште, автор этой книги делал доклад о виброизолирующем (и вибропоглощающем) эффекте antivibrаторов на пластинах. В перерыве к членам советской делегации, подошел высокий полнеющий брюнет и лаконично представился: Манфред Хекль; имя этого человека, выполнившего много интереснейших работ, известно каждому акустику. Насколько позволяли языковые барьеры, завязалась содержательная дискуссия.

Встречи с иностранными коллегами -- это всегда сильнейший психологический штурм. Мозг предельно напряжен, нельзя ударить лицом в грязь. И в этот момент внезапно пришло понимание, почему резонансные виброизолирующие системы на пластинах являются широкополосными...

"Целина" в области виброизоляции постепенно исчезает. Значительные эффекты в борьбе с вибрацией получать все труднее, нужны новые, более сложные системы и приемы. Советские ученые М. Д. Генкин, Ц. П. Коузов, В. С. Иванов, В. Т. Ляпунов, А. В. Римский-Корсаков, С. А. Рыбак, Б. Д. Тартаковский и их сотрудники в последние годы анализируют виброзадерживающие и фильтрационные свойства пространственных систем из расположенных определенным образом элементов массы и упругости. В борьбе с вибрацией строительные акустики и строительные механики целенаправленно используют все "три кита", на которых покоятся эти науки: массу, упругость и трение.

И трение...

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 (или, как сейчас модно писать по всякому поводу, матрицу) этих средств:

Звукоизоляция

Звукопоглощение

Виброизоляция (амортизация)

Очевидно, ощущалась пустота одной клетки этой таблички, чувствовалось, что раз есть звукопоглощение, то должно, видимо, быть и вибропоглощение. Ведь недаром 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.

Сколь убедительным может быть удар деревянного молотка в стальной лист! Когда на листе имелось вибродемпфирующее покрытие (даже не со стороны удара), уровень неприятного звука, излучаемого листом в окружающее пространство и фиксируемого шумомером, заметно уменьшался.

Да, действительно, виброгасители для механизмов, различные демпферы применялись и ранее. Но эти гасители использовались (и используются) для ослабления колебаний механизмов или их частей лишь на отдельных резонансных частотах, не превышающих десятков герц, причем масса таких гасителей достигает иногда нескольких сот килограммов. Речь же шла о создании легкого и удобного средства поглощения вибрации строительных конструкций одновременно во всем 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 обнаружилось, 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 1945 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 вышестоящими организациями при попытке запатентовать его.

Вначале пришел отказ. Мотивировка: облицовка корпусных конструкций резинами и пластмассами известна из ряда зарубежных патентов. Что ж, беремся за изучение этих патентов. Оказывается, в одном случае применение 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 внедрения 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 это? Как будто бьют по листу дерева или толстого картона. Введенное в конструкцию трение "спилило" гребенку резонансов конструкции.

\* Опубликовано в "Бюллетене изобретений", 1959, № 7.

И шумомер показывает уровень шума на 10--15 единиц меньше (об этих единицах -- децибелах и фонах -- мы еще поговорим во второй части книги).

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, проходившем в сентябре 1959 года в Штутгарте (ФРГ), внимание участников привлекло объявление, в котором предлагалось записываться на экскурсию из Штутгарта в Мюнхен на специальном виброзвукозаглушенном 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. Тартаковский, сделавшие накануне на Конгрессе доклады о вибропоглощающих покрытиях. Впоследствии ряд вопросов теории вибропоглощения разработал А. Никифоров.

В наше время вибропоглощающие покрытия применяются в транспортных средствах и в 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 вибропоглощения в конструкциях являются неперенным предметом обсуждения на всех акустических конференциях, конгрессах, семинарах, симпозиумах. И хоть растет энергонапряженность машин и механизмов -- главных источников раздражающей вибрации и шума -- этим шумам удастся ставить заслон, в частности, в виде материалов и конструкций с весьма большим внутренним трением.

Малозумные шестерни с зубьями из текстолита.

ЕСТЬ ЛИ ЧТО-НИБУДЬ НЕ ПОЮЩЕЕ В МИРЕ?

Запели тесные дроги ...

С. Есенин

Пытаются шептать клочки афиш,

Пытается кричать железо крыш,

И в трубах петь пытается вода

И так мычат бессильно провода.

Е. Евтушенко

До сих пор шла речь о колебаниях, вызванных преимущественно периодическими силовыми воздействиями. Имеется, однако, весьма обширный класс колебаний, источником которых может служить какой-либо постоянный фактор: лоток 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" именуется так не за шум разбивающихся волн, а именно за рев и вой ветра в снастях судов. Чичестеру во время "одиночной кругосветки" пришлось изучать язык своего судна. "Каждый вздох, треск или грохот что-то означал; даже каждый оттенок завывания ветра в гротштаге имел свой смысл". Со временем Чичестер смог по звукам вполне точно определять скорость и направление ветра.

В великолепной монографии У. Брэгга "Мир света, мир звука" (к сожалению, сейчас подобные капитальные научно-популярные книги все больше вытесняются брошюрками-однодневками) имеется глава "Звуки деревни". Здесь что ни звук, то автоколебания. Стрекотание кузнечиков и цикад, журчание ручья, мычание и бляение 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 фиоритуры 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 опустил 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...

Да, много веков прошло со времени обнаружения поющих песков, а удовлетворительного объяснения этому поразительному феномену не было предложено. В последние годы за дело принялись английские акустики, а также советский ученый В. И. Арабаджи. Этому специалисту, по-видимому, всегда влекли к себе необычные акустические явления в природе. Раскрывая очередной номер Акустического журнала АН СССР и видя в оглавлении фамилию Арабаджи, можно заранее сказать, что речь пойдет об анализе шума грома, тайфунов или водопадов, звуков в пещерах и подземных галереях. Дошла очередь и до поющих песков. 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 автоколебания. 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; гармоники, в которых звук производят металлические язычки, колеблющиеся под действием постоянного потока воздуха; органы, из труб которых вырываются через узкие щели резонирующие столбы воздуха.

У кого 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 практическим представлениям 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 доказательством того, насколько несправедливо бытующее иногда мнение об ученых, как о сухих, черствых людях, которым чуждо все человеческое. Когда наступило время доклада Бшорра о мемнонском колоссе, то в аудитории поистине яблоку негде было 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.

Перейдем, однако, от уникальных памятников старины к научно-техническим творениям современности. Используя автоколебательные системы и принципы, удалось создать много нужных машин, приборов, устройств. В разработанных человеком устройствах особенно отчетливо выделяются три элемента необходимых для осуществления автоколебательного процесса. Это -- 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 инструменты, 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 удается 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 деревьев на ветру (вспомните, как трепещут на своих податливых черенках листья осины). О сорвавшихся с дерева 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 -- виляющие 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. 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 колебательные движения в перпендикулярном направлении. Итак, мы коснулись автоколебаний приятных (некоторые музыкальные звуки), автоколебаний полезных (составляющих основу устройства 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 и 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 особенный голос: дверь, ведущая в спальню, пела самым тоненьким дискантом; дверь 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 навеивается мне тогда вереница воспоминаний!" Интересно, что сказал бы Гоголь или его милые старички, 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. Чедд. Звук

Автор должен предупредить читателя, что, несмотря на жизнеутверждающий тон заголовка, в повествовании об ультразвуке будет и доза lamentаций. Но сначала некоторые воспоминания довольно давних лет. Тема их также, естественно, связана с названием. К тому же они радостны, как всякие воспоминания ("что пройдет, то будет мило" -- А. С. Пушкин).

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

-- Что-то вас мало сегодня. Ясно, до сессии еще далеко, а погода хорошая. Пойдем и мы погуляем.

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 делали эмульсию ртути с маслом и водой. Если мощность звукоизлучения достаточна, можно эмульгировать практически любые компоненты. Но и это далеко не все. Пробовали на металлургическом заводе облучать ультразвуком расплавленный металл. Зернистость его уменьшается 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 четыре десятилетия. Просматриваю только что вышедшие книги по применению ультразвука: "Ультразвуковая технология", 1974; "Применение ультразвука в промышленности", 1975. Конечно, техника значительно усовершенствовалась, 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 коллективных монографиях упомянуто хотя бы вскользь имя основателя советской (и, по существу, мировой) ультраакустики, предвосхитившего многие применения ультразвука? Нет, в этих отечественных изданиях (в отличие от некоторых иностранных работ) напрасно было бы искать имена людей, стоявших у истоков ультраакустики...

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" (сущ

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

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.

ствуют 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 из 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 ультразвуковое оборудование изготавливают 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 вперед.

Другая важная сфера применения ультразвука -- автоматический неразрушающий контроль. На судах широко применяются ультразвуковые уровнемеры и расходомеры различных жидкостей в трубах и сосудах. На ежегодном симпозиуме по ультразвуку, проходившем в 1974 году в г. Милуоки (США), американские специалисты сообщили о разработке высокотемпературных ультразвуковых преобразователей для контроля узлов жидкотемпературных атомных реакторов. Эти преобразователи могут применяться как в стационарных, так и в судовых ядерных энергетических установках.

Ультразвуковая дефектоскопия металлических листов и различных изделий является примером 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 совершенствовались. 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 с частотой до нескольких мегагерц.

Весьма интересные и глубокие теоретические исследования в области ультразвуковой дефектоскопии были выполнены Л. Г. Меркуловым.

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 ультразвуковых волн проявляется прежде всего в ослаблении принимаемого сигнала. Синхронное движение вдоль поверхности изделия излучателя и приемника позволяет обследовать всю площадь испытываемого изделия.

Более совершенный импульсный эхо-метод 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 определять 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. Броневые плиты, 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 потому 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 фиксируются нарушения положения и формы внутренних органов, наличие опухолевых процессов 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-преобразования с измеренными сигналами, определяют частотный отклик ткани и с помощью ЭВМ вычерчивают электронный аналог модели ткани. Тщательный анализ полученной документализированной модели позволяет обнаружить участки ткани даже с незначительной патологией, которая могла ускользнуть от внимания врача-исследователя при простом "просвечивании" ткани с помощью того же ультразвука.

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 пути 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.

ОТ ДЫМОВЫХ ФИГУР  
ДО АКУСТИЧЕСКОЙ  
ГОЛОГРАФИИ

Наука начинается с тех пор, как начинают измерять.

Д. И Менделеев

"Я первым увидел звук"

Надпись на могиле 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 трудновыполнимыми, 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 измерений 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, вибропоглощения, 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, Б. Д. Тартаковским и другими, в ФРГ -- М. Шредером.

Мы остановимся здесь лишь на одном вопросе 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 частицы 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 Фуко в середине прошлого столетия для исследования однородности оптических сред и качества обработки оптических деталей. Существо его заключается в следующем. 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, хотя 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, наоборот, 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 (Schliere-- 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 в различных странах 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. На приведенной фотографии видно, как меняется характер рассеяния звуковых лучей в воде от металлических пластинок -- гладкой и снабженной ребрами (периодическими препятствиями).

Картина рассеяния звуковых лучей в воде от однородной пластинки и пластинки с 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.

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.

Слой холестерина на такой пленке напоминает слой затвердевшей фотоэмульсии.

Тонкий слой воды, налитый на поверхность соединенной с вибратором металлической пластины, также позволяет визуализировать ее колебания.

Осыпавшаяся при колебаниях металлической стенки или пластины фундамента меловая паста указывает места наиболее интенсивной вибрации, на которые следует устанавливать антивибрационные устройства.

Если коснуться его пальцем" то вокруг места касания возникнут концентрические разноцветные круги. Каждому цвету при этом соответствует определенная температура. Картина похожа на цвета побежалости на зачищенной поверхности остывающего металла.

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 измерения 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 звука в пластинах света на экране за вторым поляроидом нет, 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 динамического громкоговори

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

теля 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" в 1975 году и суммирующей результаты трех ежегодных международных симпозиумов по акустической голографии. Хотя перспективы применения ее велики в самых разнообразных областях (подводное звуковидение, визуализация предметов в мутных средах, что особенно важно при аварийно-спасательных и водолазных

работах), но предстоит еще большая работа по повышению качества изображений.

Сцептроника. Это 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 "разнопольные" 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 этим методом, можно создать материалы с максимальным или, наоборот, минимальным коэффициентом механических потерь на ультразвуковых частотах.

Предсказанные теоретически С. А. Альтшуллером и исследованные экспериментально У. Х. Копвиллемом 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<sup>9</sup> 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, являвшийся продуктом взаимодействия акустических и световых волн. В жидкости возбуждалась система 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 Люка и Бикаром во Франции, Раманом и Натом в Индии, 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.

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 назвали это направление "разнопольных" взаимодействий оптоакустикой.

Механизмы оптического возбуждения звука многообразны. Звук может возникать вследствие поглощения интенсивного света в среде. Этот механизм связан с релаксационными процессами, изучение которых является предметом молекулярной акустики (заметим, что молекулярная акустика сама по себе представляет обширную область, и отечественные школы И. Г. Михайлова, В. Ф. Ноздрева и других имеют большие достижения в этой области). Кроме того, звук может возбуждаться в результате резкого изменения агрегатного состояния среды (испарение, ионизация) вследствие электрострикционного эффекта.

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.

Различными авторами исследовались случаи излучения звука при воздействии на вещество мощных тепловых полей, импульсного электрического напряжения и т. д.

По мере повышения частоты, то есть уменьшения длины волны ультразвуковых колебаний звуковые волны начинают "замечать" дискретную структуру твердых тел -- кристаллическую ионную решетку. Здесь становятся плодотворными корпускулярные представления. Согласно современной физике, любая волна ведет себя при определенных условиях как частица, и наоборот: любая частица ведет себя при определенных условиях как волна. Один из классиков физики Уильям Брэгг иронически заметил по этому поводу, что каждый физик вынужден считать свет состоящим по понедельникам, средам и пятницам из частиц, а 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.

\* С. И. Вавилов. Глаз и солнце. Изд. 9-е. М., "Наука", 1976, с. 42.

И хотя отдельные противоречия остаются, квантовая механика позволила сделать выдающиеся открытия.

Звуковой волне соответствует частица, которая была названа фононом -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 фононов не имеют той устойчивости, которая свойственна параметрам элементарных частиц. В процессе распространения звука изменяется характер упругих колебаний, волна из поперечной может переходить в продольную, поверхностную и т. п. Эти процессы надо рассматривать как превращения фононов в другие виды, то есть

следует предположить многообразие фононов.

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

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 фононами Ф.

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 усиливается вследствие того, что резонатор "отсасывает" звук с довольно большой площади фронта волны и трансформирует в параметры колебательного процесса. Но в резонаторе нет какого-либо постоянного постороннего источника звука, усиливающего колебательный процесс подобно тому, как это происходит в электронном усилителе благодаря наличию постоянного электрического источника питания.

Принцип действия фонон-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 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 квантовые усилители ультразвука, в которых на расстоянии 10--15 миллиметров удается получить усиление бегущего ультразвукового импульса в тысячи раз. При непрерывном излучении звука концентрация энергии в относительно малом объеме полупроводника становится настолько велика, что возникает проблема его охлаждения во избежание падения коэффициента усиления.

Многочисленные проблемы квантовой акустики регулярно обсуждаются на специальных международных и всесоюзных 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 безвременным скончавшимся академиком Р. В. Хохловым с сотрудниками, а также В. А. Красильниковым и другими советскими учеными.

"Разнопольные" эффекты и взаимодействия, электрон-фононные, фотон-фононные, фонон-фононные процессы -- манящая и увлекательная область физической (а в недалеком будущем, несомненно, и техни-ческой^ акустики, "

## ЧАСТЬ II

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

Рэлей

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

ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

## МИЛЛИОНЫ УКЛАДЫВАЮТСЯ В ДЕСЯТКИ

... Слуховой орган превращается в руках Гельмгольца в тонкий физический инструмент...

И М Сеченов

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

$$30 + 30 = 33$$

$$70 + 70 = 73$$

$$100 + 100 = 103$$

$$30 + 20 \text{ p } 30$$

$$70 + 60 \text{ p } 70$$

$$100 + 90 \text{ p } 100$$

Относящийся к этим колонкам вопрос к читателю похож 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 это иногда делается, к ответам, написанным в перевернутом виде, либо помещенным где-то через десятки страниц. Скажем сразу, что равенства отображают некоторые зависимости условной алгебры децибелов -- логарифмических единиц, принятых для расчета и измерения уровней звука или вибрации. В названии "децибел" увековечено имя изобретателя телефона Грэхема Белла. Один децибел соответствует едва заметному на слух приросту громкости звука.

Но почему децибелы сродни логарифмическому исчислению? В первую очередь потому, что они отражают мудрую особенность слухового (и не только слухового) восприятия живых существ: прирост ощущения пропорционален логарифму раздражения. Человечество не случайно приняло "на вооружение" в науке и технике логарифмические масштабы: зачастую упрощается 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. Как видим, 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.

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%. Надо до нуля доводить энергию звука.

Он оглянулся на гостя, ища поддержки. Пришлось несколько охладить его:

-- Снижение звукового уровня на тридцать децибел соответствует уменьшению звуковой энергии не на тридцать, а на 99,9%. 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 100000%. 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 в сто герц вдвое требуется повысить его до двухсот герц, т. е. на сто герц, а для увеличения вдвое высоты тона в тысячу герц потребуется увеличить его частоту уже на тысячу 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 частотной шкалы уж никак не превысит двадцати метров.

-- Тоже многовато, -- усмехнулся главный инженер.-- Да, акустика -серьезная вещь, -- продолжал он задумчиво.

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

-- Вы это учтите!

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 тридцать 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 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 удосуживался сделать это. Конечно, здесь все сильно зависит от того, какой масштаб принять за основу. Один децибел, т. е. едва уловимая на слух величина громкости, соответствует приросту звуковой энергии примерно на 25% ее исходной величины. Логично за единицу линейной шкалы принять разность энергий (точнее, интенсивностей ее, т. е. 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 1014 раз больше, чем на пороге слышимости. Таким образом, диапазон воспринимаемых человеком интенсивностей звука равен  $1014 J_0 - J_0$ .

Число делений линейной шкалы интенсивностей звука п будет, следовательно, равно  $n = (1014J_0 - J_0) / (1,25J_0 - J_0) = 4 \cdot 1014$ .

Если деления линейной шкалы взять равными 1 миллиметру, то протяженность (в километрах) линейной шкалы воспринимаемых ухом интенсивностей звука составит  $n/10^6 = 400$  миллионов километров, то есть заметно больше, чем расстояние от Земли до Солнца.

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

## ОСТРОВОК СЛЫШИМОСТИ В ОКЕАНЕ НЕВОСПРИНИМАЕМЫХ ЗВУКОВ

Итак, уже изображение в линейном масштабе диапазона воспринимаемых человеком звуковых энергий потребовало космической шкалы. В действительности же область могущих существовать 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". Уже упоминалось, что человек назвал ее "порогом слухового восприятия". Как видим, эта граница довольно сильно искривлена. Ниже всего она опускается в области частот 1--5 килогерц, это и есть частотная область максимальной чувствительности слуха. Хотя у некоторых животных она может располагаться еще ниже, но, в общем, и человека природа одарила достаточно щедро. Тишайший шепот влюбленных, легкий вздох человека, шорох ползущего по стенке жучка -- вот звуки, близкие по интенсивности и приближающиеся к этой границе.

Остров слышимости в океане звуков.

Для любителей количественных данных укажем, что амплитуда звуковых колебаний в воздухе на пороге слухового восприятия лишь немногим больше атома водорода, а мощность звука, поглощаемая ухом, не превышает микрокосмической цифры 10-30 ватт. Эта микрокосмика хорошо согласуется с теми по-настоящему космическими цифрами, которые упоминались в предыдущей главе.

От границы 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 децибелов 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 попросту разрушается.

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 специальных мер предосторожности.

Мореплавателям известны "ревушие сороковые" широты. Здесь, в акустике, -- это ревушие 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. Прекратится ли рост интенсивности звука? Отнюдь. Один из полупериодов звуковой волны (полупериод разрежения) будет урезаться, но другой - полупериод сжатия -- может быть сколь угодно большим. Такие сверхмощные нелинейные звуки создаются, например, с помощью сильнейших сирен или в системах звуковых концентраторов. Можно сказать, что границы звукового океана здесь бесконечны...

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 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, -- 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 шагреновая кожа, имеет тенденцию "съезживаться" 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 двадцать назад. Промысловики заметили, что киты обнаруживают китобойные суда по подводному шуму двигателей и стараются уйти от них. Бюро, проектирующее китобойные 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: и без того истребление китов приняло поистине чудовищные размеры.

#### 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. Милн 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. Когда воспроизводили два-три тона, -испытуемые не ошибались. При пяти и более тонах количество ошибок резко возрастало. Был сделан вывод,

что при звучании нескольких тонов испытуемые могут принять и передать не более 2--2,5 бита \* информации. Примерно такой же результат был зафиксирован при восприятии нескольких тонов одинаковой частоты, но переменного звукового уровня (в пределах от 15 до 110 децибел) .

\* Бит -- стандартная двоичная единица информации -- дает указание о том, сколько взаимоисключающих выборов надо сделать, чтобы получить правильный ответ ( $\log_2 2 = 1$  бит;  $\log_2 10 = 3,32$  бита).

Результаты опытов со зрительным восприятием немногим отличались от результатов экспериментов со слухом. Когда раздражители, которым подвергались испытуемые, различались по размеру, люди могли пропустить 2,8 бита информации, если же раздражители различались по яркости, то пропускная способность человека не превышала 2,3 бита.

Таким образом, при восприятии элементарных сигналов пропускная способность органов зрения и -слуха примерно одинакова. Однако способность к нюансировке, к восприятию сложных сигналов у глаза значительно больше, чем у уха. Известна также значительно большая пропускная способность зрительного нерва в сравнении со слуховым, большая 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, скажем, 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 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, констатировавший, 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 зарождается, со временем в результате сложнейших исследований подтвердит интуитивный вывод Гераклита, и вопрос о предпочтительности того или иного органа чувств будет в значительной степени заменен признанием их 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 ранее 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, в общем, 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 его 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 (вид нескольких таких кривых приведен далее -- в главе об инфразвуке). 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.

Мы еще поговорим о шумовой атаке на человека созданных им в XX веке машин. Здесь упомянем лишь о раздражающем эффекте звуков физиологического, главным образом речевого происхождения: громкой речи, криков детей и т. п. Особенно сильно действует иногда невнятная отдаленная речь, смысл которой бессознательно, автоматически пытаются распознать соответствующие центры в мозгу человека. Подобные воздействия, относящиеся к компетенции психоакустики, пока еще не оцениваются количественно.

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 называют маскируемым, а второй маскирующим. Эффект маскировки может быть отображен повышением порога чувствительности уха по отношению к маскируемому звуку, то есть понижением чувствительности слуха на частоте (или частотах) маскируемого звука.

Нельзя сказать, что маскировка звуков -- открытие физиологической акустики наших дней. О ней говорилось еще... в древнегреческих мифах.

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.

Бог богов Кронос (Крон), как известно, был склонен к такому странному занятию, как глотание собственных детей. Эта незавидная участь грозила и кронову последышу -- будущему великому Зевсу. Но находчивая мать Зевса Рея дала Крону проглотить завернутый в пеленки камень, а младенца упрятала 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 монотонным шумом,  
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 имеет место при совпадении частот маскируемого и маскирующего звуков. Если уровень маскирующего звука в достаточной мере превышает уровень маскируемого, то последний полностью подавляется первым.

Попробуем отнести 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 частоту маскирующего тона на такой же интервал 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. Найдено и физиологическое объяснение этому явлению: причина кроется в нелинейности восприятия звуков слуховым аппаратом. Как известно из радиотехники, при нелинейной характеристике чувствительности какого-либо аппарата или тракта в нем кроме основного воздействующего тона возникает ряд обертонов, т. е. 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.

Интенсивность обертонов в нелинейной системе возрастает с увеличением интенсивности основного тона. Поэтому мощные звуки, хотя бы и с частотами ниже частоты полезного сигнала, будут обладать особенно сильным маскирующим действием.

А теперь -- волнующий корабелов, да и других транспортников вопрос о маскировании 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 электроакустическом 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 эпитаф. Если футуристы считали крупным вкладом в стихотворчество три бессмысленных слога, то входящие в ГОСТ 50 артикуляционных таблиц по пятидесяти 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% число правильно понятых фраз достигает 90% (вот роль смыслового фактора!). При слоговой артикуляции 70% процент правильно понятых фраз близок к 100, причем смысл фраз улавливается почти без напряжения.

Специалисты по физиологической акустике подметили, что для разборчивой речи наиболее важна полоса частот, близкая к области максимальной чувствительности слуха. Максимальные звуковые уровни в спектре женской речи ближе к этой частотной полосе, чем в спектре мужской речи. Поэтому голос женщины-диктора, особенно в условиях низкочастотных помех, может быть несколько более разборчивым, чем голос диктора-мужчины. И естественно, что тот же женский голос, который иногда похож на сладостную трель соловья, может, как более высокочастотный, оказывать при некоторых условиях и более сильное раздражающее действие, чем мужской баритон. Очевидно, тут уже действуют не только или даже не столько факторы физиологической акустики, сколько обычные житейские категории.

Можно было бы еще много говорить об удивительном аппарате слухового восприятия: о том, как благодаря бинауральному эффекту двух ушей определяют со значительной точностью направление на источник звука; о разрешающей способности слуха к восприятию двух близких по частоте или интенсивности звуков; об интереснейшем устройстве самого слухового аппарата человека и т. п. Но это вышло бы за рамки нашего краткого повествования об удивительном мире звука.

Так что же, неужели у уха совсем нет недостатков? Есть, конечно; упомянем лишь один из них. Он связан все с той же громкостью звуков. Диапазон воспринимаемых слуховым аппаратом громкостей, как мы видели, весьма велик. Но вот в области сравнения громкостей двух даже раздельно создаваемых 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, хотя бы 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 Ювенолом и Лукрецием Каром.

Раздражают человека производственные шумы, 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 70% страдают теми или иными нарушениями нервной, сердечно-сосудистой и иных систем. У палубных команд процент травматизма был гораздо меньше.

Конечно, не последнюю роль в травматизме 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 Портсмутом и Райдом.

Диаграммы имеют вид концентрических кругов с уровнями звука до 100 децибел. Судно тащит с собой эти "круги шумового ада", и жители прибрежных селений задолго узнают о приближении судна.

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 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 расстояния 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.

Перспектива, конечно, не из веселых. Но в наши дни дело до этого еще не дошло, не так ли?

Однако что это 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 децибелов 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) превышает допустимые нормы, хотя здесь движутся лишь легковые автомобили.

Что же тогда говорить о машинах грузоподъемностью 10, 20, 30 тонн, автомотрисах с моторами мощностью в 300--500 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". Доля интеллектуального труда до 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 и двери.

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 утверждению 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 общий спальный мешок, чтобы можно было согревать 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 голландский ученый Ван ден Эйк выступил с докладом "Радио моих соседей". Докладчик показывал спектрограммы и уровни звука в обычной квартире при работе громкоговорителей 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.

Проходит еще несколько лет. И ...опять доклад Ван ден Эйка: "Шаги моих соседей". (Интересно, о чем доложит голландец на очередном конгрессе. Не уподобится ли он Нансену и не выступит ли с докладом "Храп моих соседей"?)

Шутки шутками, но, например, в Швейцарии хлопнуть дверью автомобиля считается уже значительным нарушением общественной дисциплины.

Некоторые полагают, что значение квартирных шумов в наше время возросло в связи с внедрением стандартных облегченных строительных конструкций. Но вот две выдержки из "акустического" рассказа А. П. Чехова "Дома". "...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". А в конце рассказа читаем: "За потолком не слышались уже гаммы, но обитатель второго этажа все еще шагал из угла в угол".

Так что Ван-ден-Эйковы "Шаги моих соседей"-- отнюдь не навязчивая идея.

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

Воздадим же хвалу сиплону, такому немощному - и даже чуть комичному свисту,

который издает теперь 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.

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, в общем, теплоходе. (У телеграммы была и вторая часть: "...а души мы сами спасем", но это уже не имеет отношения к предмету нашего повествования.)

Вспору 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, запрещающий 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 на 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 ценные породы рыб, идущих на нерест.

Сейчас человечество располагает по крайней мере четырьмя "эшелонами" шумо- и виброзащитных средств. Авангард противошумовой 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, можно в ряде случаев заметно снизить их шум и вибрацию.

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, Г. А. Хорошевым, Е. Я. Юдиным и другими.

Вторая и третья линии защиты от вредных шумов и вибрации схожи друг с другом. Это физические методы и приемы, о которых упоминалось раньше: звукоизоляция, звукопоглощение, виброизоляция, вибропоглощение, рассогласование механических или акустических сопротивлений. Отличает эти "защитные линии", по существу, лишь их расположение относительно источника шума и вибрации. Вторая линия непосредственно примыкает к источнику. Это -разнообразные глушители шума, звукоизолирующие кожухи и капоты вокруг механизмов, амортизаторы под лапами и рамами механизмов, вибропоглощающие 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 слой... мыльной пены, наносимой на излучающие звук поверхности. Аналогичные исследования, проведенные во Франции, показали, что основной эффект звукозаглушения обуславливается при этом резонансным

поглощением звука в пузырьках, имеющихся в пене. Только французские акустики применили этот способ для заглушения не станков, а ракетных двигателей. Работники акустической лаборатории Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта разработали много разнообразных средств для заглушения шума путевых и строительно-дорожных машин, в результате чего шумность этих машин была снижена в несколько раз.

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 противошумовыми наушниками. Еще одна корректива романтики техникой.

Третий эшелон шумозащитных средств. Это -- звукозащитные 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% стоимости всего судна. Известен случай, когда построенный в ФРГ турбоход не был принят заказчиком из-за его чрезмерной шумности, и по истечении двух лет судно было продано за две трети его строительной стоимости.

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

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.

Мы добрались до последнего, четвертого эшелона звукозащитных средств -средств, контактирующих непосредственно с человеком. Чаще всего это противошумы, специальные противошумовые 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 шуму путь 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 в 1964 году открылся первый участок скоростной 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 никто доселе не достигал 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.

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. Это отмечают специалисты на любых предприятиях. Так, на московском почтамте уменьшение шума на 10--15 децибел повысило производительность труда при сортировке писем на 18%. Готовая 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 поднялось. (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 невероятное и необъяснимое для них беспокойство и нервозность.

В дальнейшем обширные исследования по генерированию инфразвука и воздействию его на человека развернулись во всех странах мира. Сошлемся лишь на материалы Международного коллоквиума по инфразвуку, состоявшегося в конце 1973 года в Париже. Эти материалы составляют солидный сборник объемом около 500 страниц. Начнем с печально-экзотических инцидентов, предположительно связанных с инфразвуком. Виднейший венгерский 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 резонатора, а это, как мы уже упоминали в соответствующей главе, могло послужить причиной резкого увеличения наружных колебаний атмосферного давления инфразвуковой частоты. Периодически наблюдавшееся появление судов -- "летучих голландцев" с мертвым экипажем на борту также все чаще в последнее время стали приписывать 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 высотных зданий и при этом обнаружили следующее. Во время сильных порывов ветра уровень инфразвуковых колебаний (частоты 0,1 герца) достигает на верхних этажах 140 децибел, то есть даже несколько превышает порог болевого ощущения уха в диапазоне слышимых частот. Элементарная частица нейтрино обладает, как известно, громадной проникающей способностью. Инфразвук -- своего рода "акустическое нейтрино", он способен проходить без заметного ослабления через стекла окон 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 составляет 140 децибел, а для обслуживающего персонала и окружающего населения 120 децибел.

Встреча двух поездов, движение поездов в тоннеле сопровождается появлением мощного инфразвукового шлейфа. (Актуальность этой проблемы была подчеркнута при проектировании тоннеля под Ла-Маншем).

Инфразвук в нашем повседневном окружении... На эту тему старейший английский акустик, лауреат премии Рэля д-р Стефенс докладывал на всех международных форумах. Инфразвуковые шумы, производимые градирнями теплоэлектроцентралей, различными устройствами всасывания, нагревания воздуха или выпуска отработавших газов; неслышимые, но такие вредные инфразвуковые излучения мощных виброплощадок, грохотов, дробилок, транспортеров! Инфразвуковым шумам в судостроении и судоводительстве была недавно 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. Пробовали стягивать (сначала на модели) область живота ремнями. Частоты резонансов 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 действии 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 р- и р-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 повлиять на физиологическое состояние мозга.

Кровеносные сосуды. Здесь имеются уже некоторые статистические данные. В опытах



французских акустиков и физиологов 42 молодых человека в течение 50 минут подвергались воздействию инфразвука с частотой 7,5 герца 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 функции 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 особо вредное действие инфразвука на человека, то возможно, что при нормировании инфразвукового шума придется уменьшать допустимые уровни против тех, которые разрешены для сопредельной области частот 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 Ленин

В действующих международных санитарных шумовых нормах допустимые уровни звука тем выше, чем ниже его частота. Но когда дело дойдет до нормирования на совсем низких частотах -- в неслышимом "чертовом царстве инфразвука", то, возможно, придется здесь снижать допустимые уровни.

градского института инженеров железнодорожного транспорта. В коробке этого глушителя одна из стенок сделана податливой, и это позволяет выравнивать низкочастотные переменные давления в потоке воздуха, идущего через глушитель в 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 дьявольского незнакомца, именуемого инфразвуком. Но рано или поздно это будет сделано. Остается надеяться, что черт окажется не таким страшным, как его сейчас малюют.

#### КОГДА ЗВУК УБИВАЕТ НАВЕРНЯКА

Пожалуйста, не волнуйтесь, читатель! Речь пойдет не об упомянутых вскользь "летучих голландцах" с экипажами, возможно, умерщвленными звуком. И не об описанной Октавом Мирбо китайской пытке под непрерывно звонящим колоколом, при которой узник, предварительно сойдя с ума, умирает через сутки-двое. И даже не о плавающих вверх брюхом (все в кровоподтеках!) рыбках, находящихся вблизи вибратора мощного гидролокатора в момент излучения им импульсов. Нет, речь пойдет о смерти радующей, о смерти исконного врага моряков всех времен и народов -- "морского желудка" -бальянуса 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 пароходствам. 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 уйдет из данного района) воздействуют на те мелкие морские организмы, убивать которых уж нет никакого смысла.

Вот и возникла мысль использовать для целей борьбы с поселениями бальянусов и

мидий мощные ультразвуковые колебания. 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 "колониистов"? 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 сплошности, 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 рыболокаторах 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.

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

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

При этом в воде возникают значительные силы и смещения, приводящие к гибели как самих "обрастателей", так и их личинок.

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 даже... снижение электрокинетического потенциала, а следовательно, и жизнедеятельности клеток организмов, подвергающихся озвучиванию.

Как бы то ни было, явление ультразвукового противообрастающего облучения "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 происходит и внутрь судна). Оказалось, что достаточно сильное угнетающее действие на баянусов 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 потребуются усеять подводную часть судна? П. И. Щербаков в своей статье в научно-популярном журнале указывает, что на отечественных судах устанавливают не более шести вибраторов, а иногда их количество сокращают до двух. 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 десятилетия 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 -- "утиная".

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 непрерывной 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 преобразователя "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.

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

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.

Специалисты признают, что хотя в принципе проблему улучшения качества речевой связи с водолазами и акванавтами можно считать решенной, потребуются 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.

## СВЕТОМУЗЫКА И МУЗЫКОПЕЯ

...Река звуков... переносит в душу слушателя настроения, навеянные вдохновением артиста, возносит ее в царство вечной красоты...

Г, Гельмгольц. О физиологических основах музыкальной гармонии

Мы говорим, что некоторое произведение отличается музыкальностью даже тогда, когда оно является видом живописи.. Конечно, и поэты также называются творцами мелодий.

Она же (музыка) является утешением в страданиях. Поэтому флейты и наигрывают

мелодии для людей, пребывающих в скорби, облегчая тем самым страдания последних.

Секст Эмпирик. Против музыкантов

Музыка -- колыбель акустики. И не коснуться ее, говоря об удивительном в мире звука, невозможно. Хотелось бы сказать о поисках человечеством правильных интервалов между тонами разной частоты, рождающих гармонические созвучия; о создании Пифагором с помощью опытов на его монохорде (а проще -натянутой на деке струне с перемещающимся зажимом) первого натурального музыкального строя; о перевороте, совершенном в XVII веке одним неведомым ранее органистом, которому удалось то, что не удавалось Кеплеру и Эйлеру, и который создал более совершенный равномерно темперированный музыкальный строй, сохранившийся до нашего времени; о великих мастерах прошлого, которые, не имея современных физико-математических представлений о процессе звучания тел, создавали тем не менее неповторимые по качеству скрипки; о музыкальных исканиях и порождениях XX века -- "узкоинтервальной" четвертитонной музыке; о различных "музыках шумов", "рисованной музыке" и прочем.

Хотелось бы... Но по необходимости приходится ограничивать круг рассматриваемых тем.

Цветомузыка. Новое ли это явление из области "перекрестных" психофизиологических эффектов? Еще античные философы, в частности, цитируемый нами Секст Эмпирик, говорили о слиянии эффектов восприятия музыки и живописи. Соединить цветковые 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 цветомузыкального 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 цветомузыка в ее позднейшем понимании, как не настоящей цветомузыкой 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 фокстрота или танго вспыхивают за ажурной решеткой спрятанные там разноцветные лампочки. Нет движения света, нет динамики его формы, вообще, бесполезно искать здесь какие-либо принципы цвето-музыкальных соответствий.

Первыми, кто попытался обосновать психоэстетические основы цветомузыки, 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. В разное время это произведение пытались исполнить с цветовым сопровождением, но светотехника часто недалеко уходила от упомянутых выставочных устройств.

Однако не в этом главное. До сих пор не разработаны психологические принципы цветомузыки. 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 цветомузыки: световом выражении общей идеи современного музыкального произведения, направленности его отдельных частей и т. п.? Психофизиологические исследования в области светозвука находятся, по

существо, в зачаточной 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 отвечает "видение" цвета отдельных тонов. Однако многими отмечается разделение тонов по "светлостному" признаку: низкие тона - темные, высокие -- светлые. Это подтверждают и выводы 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 цвета (коричневый, фиолетовый, черный), инструментам высокочастотной тембральной области -- светлые цвета (голубой, розовый, желтый, оранжевый).

Восприятие тональностей также происходит через светлостные характеристики: цвета мажорных тональностей светлее, чем цвета минорных, диэзные тональности считаются яркими, активными, бемольные -- блеклыми, пассивными.

Чаще всего увеличение интенсивности звукового раздражителя сопоставляется с увеличением интенсивности отвечающего ему светового. Но при исполнении светомузыкальных композиций натолкнулись и на такое психологическое явление, когда происходит "замещение раздражителей", то есть когда более сильному музыкальному раздражению у подопытного лица становится адекватно 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 цветомузыка ограничится 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. "...Нужны световые контрапункты,-- говорил он.-- 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 цветомузыки возможны другие "перекрестные эффекты" в области одновременного восприятия явлений 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, "Поэмы о лесах" и поэмы "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 цветомузыкальных систем.

У нас в стране интерес к цветомузыке 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 в интерпретации автора цветковых композиций Ю. Правдюка. Аналогичные концерты состоялись в Москве, Казани, Ленинграде и других городах страны, причем в каждом случае характер цветового сопровождения и системы реализации этого сопровождения были различными.

1 марта 1826 года Пушкин записал в альбоме пианистки М. Шимановской:

...Из наслаждений жизни

Одной любви музыка уступает,

Но и любовь мелодия...

Цветомузыка, о которой, как видно из книги Э. Дарвина, задумывались уже в пушкинские времена, быть может, одно из совершеннейших проявлений эстетической стороны музыкального искусства. Но есть у музыки и другая, так сказать, прагматическая сторона. Музыка может настраивать и мобилизовывать человека, успокаивать и лечить его. Конечно, и это не ново. Тот же 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 фармакопея ("музыкакопея"). У истоков движения в США стоял еще Т. Эдисон, отобравший с помощью специалистов-музыкантов более сотни различных 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 раздражительности, 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 почти во всех случаях помогают произведения Шопена, Шуберта, Бетховена, Прокофьева. И, конечно же, Баха, всеисцеляющего Баха, имя которого называет почти каждый из опрошенных лиц. А если по утрам из репродуктора несутся "для увеличения бодрости и создания трудового настроения" трескучие марши и пьесы некоторых современных композиторов с их ассонансами и формалистическими вывертами, это указывает лишь на неосведомленность музыкального редактора в области психоакустики. В радиовещании Прибалтийских республик чаще звучит по утрам спокойная мелодичная музыка, и ее "мобилизующий эффект" оказывается сильнее, чем у наивно-бравурных маршей. Благотворно влияние подобной музыки как средства, снимающего утомление, в частности, после долговременного действия мощного производственного шума.

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

Некоторые лица, возможно, со слабым типом нервной системы испытывают утомление и даже угнетение от вагнеровских труб и литавр (звучащих, например, в увертюре к "Риенци") или от симфоний Брукнера. С другой стороны, М. Горький, которого едва ли можно заподозрить в слабости нервной системы, писал в одном из писем: "Много не могу слушать музыку, нервы не выдерживают".

Цветомузыка и музыкакопия -- "старинные новинки". Но, как видно, за много веков, прошедших с начала их появления, прогресс в исследовании этих явлений относительно невелик. И дело здесь прежде всего в сложности процессов их воздействия на человека. У них -- все в будущем.

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".**

**ЭХО-ЛОКАЦИЯ В ПРИРОДЕ**

Те, кто обрекают 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 такие столкновения 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 первых книг о глубинах океана "Миром 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. 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 перетиранием 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!

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

Чувствительность слуха у человека 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, изучая подводный звук, 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 среды 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 дельфином и человеком.

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, 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!

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 наречен журналистами "гидронавтом No 1". Но как повидать его, если на Канарских островах, где условий для погружения особенно удобные, он бывает, 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 десятки разнообразных, порой опасных погружений в Черном и Средиземном морях, в Атлантическом океане.

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

-- Конечно, роль ее очень велика,-- сообщил Гирс.-- Можно определять места зарождения косяков рыб, пути их миграции. Хотя гидрофонные системы, ввиду относительно малого водоизмещения 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.

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

Теперь впору поговорить и 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 эхо-локационным аппаратом для поиска пищи в вечернее время. Позже были установлены количественные характеристики локационных сигналов различных семейств летучих мышей -- подковоносов, ушанов, длиннокрылое, 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.

Восхищаясь изощренным аппаратом активной звуколокации, энтомологи долгое время не обращали внимания на то, что тела бабочек, на которых охотятся летучие мыши, покрыты волосами. Оказалось, что этот волосной 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, таинственные гуахаро (южноамериканский козодой) так-же обладают способностью к эхо-локации. Их эхо-локационный аппарат не столь совершенен, как у летучей мыши, но все же позволяет им ориентироваться в пространстве. Для стрижей это важно ввиду большой скорости полета, а для гуахаро, обитающего в пещерах, -- из-за трудности перемещения в вечной темноте.

И, наконец, дельфины. С точки зрения "живой эхо-локации" 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 эхо-локации оценивать форму отражающего тела, 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 эхо-локационной картины на довольно далеком расстоянии впереди.

Несомненно, существуют и рыбы, обладающие способностью к эхо-локации, и лишь несовершенство техники глубинного лова не позволяет пока обнаружить их. Зато в научной печати появилось сообщение об эхо-локационных 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 и широких возможностях применения. А это уже служит залогом дальнейшего развития интереса к данной области науки и техники,

#### ЛИТЕРАТУРА ПО АКУСТИКЕ ДЛЯ МАССОВОГО ЧИТАТЕЛЯ

- Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А. И. Эхо-локация в природе. Л., "Наука", 1974.  
Биоакустика. М., "Высшая школа", 1975.  
Бишоп Р. Колебания. Перевод с английского. М. "Наука", 1968.  
Бреховских Л.М., Житковский Ю. Ю. Акустика океана. М., "Знание", 1977.  
Брэгг У. Мир света. Мир звука. Перевод с английского. М., "Наука", 1967.  
Галеев Б. Светомузыка: становление и сущность нового искусства. Казань, Татарское книжное изд-во, 1976.  
Голубков А.Д. Гидролокатор дельфина. Л., "Судостроение", 1977.  
Гриффин Д. Эхо в жизни людей и животных. Перевод с английского. М., Физматгиз, 1961.  
Иофе В.К., Мясникова Е. Н., Соколова Е. С. Сергей Яковлевич Соколов (О создателе ультразвуковой дефектоскопии и микроскопии). М., "Наука", 1976.  
Карлов Л. Б., Шошков Е. Н. Гидроакустика в военном деле М, Воениздат, 1963.  
Клюкин И. И. Звук и море. Л., "Судостроение", 1974.  
Клюкин И. И. Нептун оглушен... Л., "Судостроение", 1968.  
Кок У. Звуковые и световые волны. Перевод с английского. М., "Мир", 1966.  
Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны. Физматгиз, 1960.  
Лилли Д. Человек и дельфин. Перевод с английского. М., "Мир", 1965.  
Морская биоакустика. Сборник статей. Перевод с английского. Л., "Судостроение", 1969.  
Мясников Л. Л. Неслышимый звук. Л., "Судостроение",  
Простаков А. Л. Гидроакустика и корабль. Л., "Судостроение", 1967.  
Простаков А. Л. Гидроакустические средства флота, М., Воениздат, 1974.  
Протасов В. Р. Биоакустика рыб. М., "Наука", 1965.  
Тарасов Н. И. Живые звуки моря. М., АН СССР, 1960.  
Хорбенко И. Г. Неслышимые звуки. М., Воениздат, 1967.  
Чедд Г. Звук Перевод с английского. М., "Мир", 1975  
Чернов А. А. Гомо акватикус. М., "Молодая гвардия", 1968.

