

В МИРЕ НАУКИ И ТЕХНИКИ

НТ

Р. ТЭЙЛОР

ШУМ



RUPERT TAYLOR

NOISE

Second edition
Penguin Books, Harmondsworth,
Middlesex, England

Р. ТЭЙЛОР

ШУМ

Перевод с английского
Д. И. Арнольда

Под редакцией и с предисловием
д-ра физ.-мат. наук М. А. Исаковича

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА 1978

Т96 Тэйлор Р.
Шум. Пер. с англ. Д. И. Арнольда. Под ред.
М. А. Исаковича. М., «Мир», 1978.
308 с с ил (В мире науки и техники)

Борьба с шумовым загрязнением окружающей среды — одна из актуальнейших научно-технических проблем нашего времени. Этому вопросу посвящена книга английского инженера Р. Тэйлора, много лет отдавшего практической борьбе с шумом.

Широкий охват материала, популярность изложения, живой язык — все это, бесспорно, привлечет к книге внимание акустиков, конструкторов, строителей, врачей-гигиенистов и всех, кто интересуется проблемами современной науки и техники.

Т $\frac{20404-175}{041(01)-78}$ 175—78

534

Редакция научно-популярной и научно-фантастической литературы

© Rupert Taylor, 1970, 1975

© Перевод на русский язык, «Мир». 1978

Предисловие редактора

Предлагаемая вниманию читателя книга английского инженера Р. Тэйлора «Шум» посвящена весьма важной научно-технической проблеме нашего времени: борьбе с шумовым загрязнением окружающей среды. Теперь к жертвам шума следует относить не только котельщиков и клепальщиков, как это было несколько десятков лет назад, но, пожалуй, и каждого жителя города. Год от года шум растет и в домах, и на улице, и на производстве. Например, в Москве и других больших городах за последнее десятилетие шум вырос в 10—15 раз. Ученые уже давно установили, что шум вызывает тугоухость, приводит к нарушениям сна, язвенной болезни, сердечно-сосудистым, нервным и другим заболеваниям. Особенно большой вред шум приносит детям и больным.

Современная акустическая наука может предложить весьма эффективные средства борьбы с шумом. В одних случаях инженеры-акустики умеют снизить чрезмерный шум того или иного механизма, в других — изолировать этот шум, отражая его обратно к месту возникновения и не давая ему распространиться по всему помещению. Если невозможно бороться с самим шумом, с успехом применяют индивидуальные средства защиты человека: ушные заглушки (вкладыши) и противозумные наушники.

К сожалению, несмотря на то что шумовая угроза затрагивает почти все население, борьба с шумом в

нашей стране не достигла пока удовлетворительного уровня и не отвечает современным возможностям науки и техники. Конструкторы и изготовители различных механизмов и средств транспорта, а также лица, связанные с их эксплуатацией, еще не уделяют должного внимания охране населения от чрезмерного шума.

Главную причину недостаточного развертывания борьбы с шумом мы видим в отсутствии у соответствующих научно-технических кадров необходимых знаний в области акустики вообще и воздействия шума на человека в частности. Заголовок первой главы («Неведомая наука — акустика») можно адресовать большому кругу лиц, обязанных следить за акустическим климатом. В деле охраны человека от вредных внешних воздействий акустику используют меньше, чем остальные естественные науки. Это отражается даже в языке: тогда как в популярных книгах и журналах уже не считается нужным пояснять такие слова, как, например, «античастица», «лазер», «хромосома», «мягкая посадка», «жесткое излучение» и т. д., слова: «шумовая проблема», «шумность», «заглушение», «децибелы», «реверберация» и т. п. — часто воспринимаются как какие-то экзотические термины.

Такое положение вещей делает весьма важной пропаганду акустических знаний на популярном уровне. Поэтому появление в переводе настоящей книги, преследующей именно эту цель, следует считать весьма своевременным.

Р. Тэйлор — практический работник в области борьбы с шумом. Он сочетает большой опыт с ясными представлениями о физических процессах — как приводящих к генерации шума современными техническими устройствами, так и лежащих в основе способов противодействия шуму. Книга предназначена в основном для лиц, мало сведущих в акустике. Р. Тэй-

лору удалось сохранить популярность изложения, несмотря на то что в книге охвачен большой и сложный материал: основы генерации и распространения звука, работа слухового аппарата человека и повреждение слуха шумом, процессы создания шума различными механизмами и устройства для поглощения и изоляции звука; даны сведения об архитектурной и строительной акустике. Кроме того, автор вкратце рассматривает законодательные аспекты борьбы с шумом в Англии, а также приводит некоторые интересные случаи из собственной практики, когда ему сравнительно простыми средствами удавалось существенно улучшить акустические условия в шумных помещениях. Последняя глава книги посвящена «шумовой футурологии». Заключительная фраза книги оптимистична, хотя автор ясно понимает огромный масштаб и сложность задачи обуздания современной тенденции роста окружающего шума.

Тэйлор справедливо отмечает, что борьба с шумом включает, помимо всего прочего, экономический аспект и подчеркивает, что за снижение шума надо «платить» (идет ли речь о денежных затратах или об увеличении массы и габаритов заглушаемого оборудования). По мнению автора, с которым нельзя не согласиться, подход к современной проблеме шума должен быть всесторонним. Следует учитывать как физико-технические и экономические, так и физиологические стороны вопроса, совершенствовать как способы борьбы с колебаниями воздуха и вибрациями конструкций, так и надлежащие законодательные меры. Необходимость такого подхода показана в книге достаточно ясно и последовательно.

Среди имеющихся отечественных и переводных изданий, посвященных этой теме, нет книги, которая по научному и популяризаторскому уровню приближалась бы к книге Тэйлора. Наибольший практиче-

ский интерес книга представит для инженерно-технических работников промышленности и транспорта, строителей и градостроителей, сотрудников отраслевых научно-исследовательских институтов и т. д. Книга будет интересна и просто любознательному читателю, особенно если он также является жертвой шума.

М. Исакович

Нужно ли писать книгу о том, что нам приходится мириться со слишком большим шумом? Остановитесь и прислушайтесь! Но недостаток знаний о самом шуме ощущается во всем: мало кто знает, что такое шум, как он на нас действует и, самое важное, как избежать его создания.

Люди привыкли к разговорам о децибелах, хотя и не понимают, что это такое, а как бы в отместку за попытку непосвященных проникнуть в тайный мир эксперта по шумам возник целый набор новых специальных технических терминов. Такие символы, как L_{10} и $L_{эКВ}$, вписаны в правительственные постановления и кодексы правил, но даже составителям подобных документов смысл этих символов до конца не ясен.

В наше время пользоваться советами консультанта по шумам — уже не причуда. Большие промышленные компании начинают включать в свой постоянный штат специалистов по акустике, надеясь с их помощью добиться снижения шума производимых ими механизмов; однако до сих пор и инженерам, и архитекторам случается производить акустические монстры. Сейчас уже появились ученые степени по акустике, сотни студентов окончили соответствующие вузы и аспирантуру, но людей, располагающих практическими сведениями по акустике, по-прежнему не хватает.

Люди начинают понимать разницу между двойными оконными рамами для теплоизоляции и рамами для звукоизоляции, но продолжают налепливать акустические плиты на стены и потолок, тщетно надеясь «спрятаться» от шума.

Эта книга — попытка принести свет тем, для кого все, связанное с акустикой, покрыто мраком; попытка объяснить, как шум возникает и как с ним можно бороться. Книга в равной мере предназначена как для профана, страдающего от шума, так и для архитектора и инженера, а также для всех, кто сам захочет избрать акустику своей специальностью.

Неведомая наука — акустика

Звук — явление столь же древнее, как и сама Земля. Хаос, в котором рождалась наша планета, сопровождался мощными ударами, вибрацией, звуками чудовищной силы. Когда Земля остыла и возникла жизнь, природа не затихла: волны с шумом бились о скалы, ветер завывал в ветвях, гром гремел в небе. И теперь природа порою создает не меньше шума, чем человек. В 1883 г., когда вулкан Кракатау обратил в пыль и выбросил на высоту в 25 км несколько кубических километров горной породы, грохот извержения не уступал грохоту современного атомного взрыва, а, может быть, и превосходил его.

У животных, которые в процессе эволюции приспособлялись к жизни на недавно остывшей Земле, возникли особые отростки головного мозга — органы слуха, и животные получили возможность улавливать звуки из окружающего их мира. Это увеличило шансы на выживание, так как звуки несут информацию; для обитателей первобытной Земли эта информация в основном сводилась к предупреждениям об опасности. Позже с помощью звуков начала устанавливаться связь. Различные звуки, издаваемые животными, служили для передачи сигналов опасности, способствовали объединению животных со стадным инстинктом и даже помогали процессу размножения — пользуясь любовным зовом, особи разных полов легче отыскивали партнеров.

Из всех живых существ только человек сумел полностью воспользоваться свойствами окружающей среды как носителя звуков. Не довольствуясь ворчанием и мычанием, человек, по мере того как росло количество информации, которую ему надо было передавать,

учился издавать все более разнообразные звуки. Ведь человек — это общественное хищное животное; он уже не мог, подобно его предкам приматам, развалившись на ветвях деревьев, лениво тянуться за свисающими с них плодами. Общенье с себе подобными стало для него жизненно необходимым. Выслеживание дичи, взаимная помощь при преследовании и умерщвлении добычи, предупреждение о грозящей опасности — все это требовало постоянно увеличивать содержательность общения, и таким образом человеческая речь родилась в силу острой необходимости.

Вскоре человек обнаружил, что звуки могут служить и другим целям; он обратил внимание на грохот, возникающий при ударах по пустому котлу для варки пищи, на звон и гудение тетивы натянутого охотничьего лука при вылете стрелы — так появились первые музыкальные инструменты.

Но не только речь и музыку внес человек в мир звуков. С отдаленнейших времен человек изготовлял примитивные орудия, обрабатывая камни, и, вероятно, не один пещерный житель затевал драку со своим соседом из-за непрерывного шума, сопровождающего обтесывание каменного топора. А когда человек изобрел колесо, он, сам того не сознавая, посеял первое зерно современной проблемы шума. Уже в древнем мире стук колес по каменной мостовой у многих вызывал бессоницу; позже в городах мостовые возле домов стали устилать соломой, чтобы приглушить цокот копыт и грохот железных колесных ободьев.

Железный век принес новые шумы: звон и грохот металла, из которого ковали оружие и утварь, не смолкая, разносились над поселениями. Человек научился создавать звучания, приятные для слуха, иными словами, творить музыку; но вместе с тем, производя все более громкие и неприятные шумы: треск и стук, скрежет и грохот, — он загрязнял звуками окружающую среду и притуплял свой слух. В сохранившихся кое-где и поныне первобытных сообществах преобладают природные звуки, а сам человек почти не производит шумов. Развитие же техники привело к резкому увеличению шума. В течение многих веков человеческий слух не знал худших раздражителей, чем шум, возникавший при обработке дерева, камня

или металла. Изобретение пороха принесло относительно новый вид шума — звуки взрывов, а также первую реальную опасность повреждения слуха. Наиболее сильный шум в те дни, безусловно, производили боевые сражения, где лязг топоров, мечей, доспехов и пушечная пальба заглушали вопли раненых, пение горнов и барабанную дробь.

Но только промышленная революция возвестила о приходе эпохи шума. Новые фабрики, рудники, доменные печи принесли с собой всестороннее загрязнение среды: зловоние, дым, обезображенный пейзаж и, разумеется, шум. С изобретением паровой машины и созданием больших механизмов проблема шума обострилась. Развитие железных дорог, появление двигателя внутреннего сгорания и рост применения стали — все это сопровождалось усилением шума. Теперь мы изобрели ракетный и дизельный двигатели, сложнейшие станки, и все они вносят свой вклад в общую какофонию. Сейчас большая часть населения земного шара страдает от шума. В одном отчете о проблеме шума¹ сравнивались результаты обследований, проведенных в 1948 и 1961 гг.; в обоих случаях было опрошено 1400 человек. Каждому был задан вопрос, случалось ли ему когда-либо, находясь в квартире, испытывать беспокойство от шума, поступающего снаружи. В 1948 г. утвердительно ответили 23% опрошенных, а в 1961 г. — уже 50%.

Печальная истина заключается в том, что, за редкими исключениями, развитие техники и успехи технологии всегда сопровождалось общим усилением шума. Это и не удивительно, потому что до середины XIX в. никаких конкретных познаний о шуме не было, и борьба с ним не выходила за рамки, которые непосредственно подсказывал здравый смысл. И только во время второй мировой войны, когда акустика шагнула далеко вперед в Европе и Америке, этот раздел физики поднялся до уровня современной точной науки.

Век за веком ученые занимались исследованием звука: еще Пифагор проводил опыты с колебаниями

¹ «Шум» — заключительный отчет Комитета по проблеме шума; Управление по изданию официальных документов, 1963 г.

натянутой струны. Потом, в течение сотен лет, все выглядело так, словно труды Пифагора были не только началом, но и завершением науки о звуке. Позже некоторые великие ученые — от Аристотеля и Евклида до Птолемея — строили теории звука, которые, однако, не имели прямой связи с физической стороной этого явления. И только 1500 лет спустя Галилео Галилей заложил основы акустики. Он начал примерно с того, на чем остановился Пифагор, и опять задрожала струна!

Творцами современной акустики, несомненно, были Герман Гельмгольц и лорд Рэлей, которые во второй половине XIX в. выполнили — независимо друг от друга — ряд фундаментальных теоретических работ. Сейчас Гельмгольц известен преимущественно своими работами по теории резонаторов¹, а славу Рэлею наряду с другими его трудами принес трактат «Теория звука», опубликованный в 1877 г. и содержащий существенно новые идеи. В 1904 г. Рэлей был удостоен Нобелевской премии в области физики².

Исследования шума и возможностей борьбы с ним, начатые несколько позже, первое время ограничивались вопросами, связанными с наземным и воздушным транспортом, а также работами по архитектурной акустике; но вскоре эти исследования значительно расширились и теперь охватывают все аспекты проблемы. Сейчас почти в каждой промышленно развитой стране существует научное акустическое общество, и список публикаций по вопросам шума непрерывно удлиняется. Современная акустика включает такие различные области, как ультразвуковая технология, имеющая огромное практическое значение для промышленности, подводная акустика, гидролокация, проблемы вибраций, музыкальной акустики, аудиологии и т. д. Акустику преподают в высших учебных заведениях, и многие крупные промышленные пред-

¹ Следовало бы упомянуть и другие фундаментальные работы Гельмгольца, особенно «Трактат о слуховых ощущениях». — *Прим. ред.*

² Нобелевская премия была присуждена Рэлею не за работы в области акустики, как можно заключить из контекста, а за труды по плотности газов и за открытие аргона. — *Прим. ред.*

приятия организуют собственные лаборатории для акустических исследований.

И все же, если попросить неспециалиста дать точное определение децибела, редко можно услышать нечто вразумительное. Как-то я посетил предприятие, на котором остро стояла проблема шума, и мой клиент, квалифицированный инженер, приветствовал меня задорным восклицанием: «Я и сам все знаю про шум, вы измеряете его в Изабеллах!». А владелец одной фабрики распорядился установить во всех цехах микрофоны и соединить их с усилителями и громкоговорителями, размещенными снаружи на пустыре, для того чтобы микрофоны всасывали цеховой шум, а громкоговорители выводили его наружу! Само слово «акустика» для многих служит символом неких таинственных явлений, и мистического искусства.

В пятом классе школы на уроках физики детям объясняют, что такое звук; многие мальчики вертели в руках камертон, знают о длине волны и частоте; юным музыкантам рассказывают о колебаниях струн, о трубах и обертонах, но дальше этого обучение продвигается очень редко.

Конструкторы современных сложных машин несут на себе всю тяжесть ответственности за сильнейшее раздражение, которое шум вызывает у большого числа людей, но тем не менее в своей профессиональной подготовке конструкторы почти не получают сведений относительно шума и способов его предотвращения. Только в последнее время аудитории высших учебных заведений стали зачислять те, кто более не может обойтись без знания акустики.

Борьба с шумом как объект серьезного изучения вышла на беговую дорожку технического соревнования с большим опозданием. По-видимому, шум считался либо дозволенным, либо просто неизбежным. Год за годом все пожимали плечами и полагали, что это одна из тех проблем, с которыми все равно никто не справится. У тысяч рабочих и работниц хлопкопрядильных фабрик уже после нескольких лет работы возникает стойкое повреждение слуха; котельщики даже щеголяют тем, что после клепальных работ внутри котла они целую неделю ничего не слышат; но мало кто относится к этим фактам иначе, чем

к обычным невзгодам, связанным с профессией. Повреждения слуха, официально обозначаемые как «понижение слуха, обусловленное шумом», настолько распространены, что стало совсем не просто проводить обследования с целью установления критерия «нормального слуха». Мало кто из отбывавших действительную военную службу избежал повреждения слуха от орудийной стрельбы. В кабинах грузовиков с дизельными двигателями шум достигает чрезмерно высокого уровня, и почти на всех заводах имеются цеха, где уровень шума опасен для слуха. Молодежь рискует получить непоправимые повреждения слуха на концертах бит-групп и других модных музыкальных ансамблей. Вообще говоря, работа в промышленности всегда связана с повреждениями слуха: недавно один инженер по звукофикации, работающий в крупном предприятии кинопроката, отметил, что в кинотеатрах на севере Англии всегда устанавливается более высокий уровень звука, чем на юге страны¹.

Почему так много шума? Что это — неизбежность или невежество? Шум — побочный продукт. Однако, например, в химическом производстве побочный продукт всегда означал бы какую-то потерю прибыли, и инженеры быстро отыскали бы способ использовать его. Доля же энергии, затрачиваемая на создание шума так ничтожна, что этой потерей можно полностью пренебречь. Так, при работе ракетного двигателя общей мощностью, скажем, в несколько сотен тысяч киловатт утечка энергии в форме шума составляет всего несколько десятков киловатт. К тому же устройство человеческого уха таково, что шум ракетного двигателя оказался бы практически неслышимым только в том случае, если отношение мощности шума к мощности двигателя удалось бы снизить до одной десятиллиардной ($1 : 10^{10}$)! Очевидно, какой-то уровень шума неизбежен, и ракетный двигатель никогда не будет звучать, как шепот. Но в подавляющем большинстве случаев шум можно существенно ослабить, и это не делается только потому, что ни конструкторы грохочущих машин, ни те, кто на этих машинах ра-

¹ Шумные отрасли промышленности получили большее распространение на севере страны. — *Прим. ред.*

ботаает, не знают, как снизить шум, либо не имеют на это средств. При наличии денег на соответствующие переделки лишь очень и очень немногие задачи по устранению шума оказываются неразрешимыми, и всегда следует помнить, что экономика — такая же неотъемлемая часть борьбы с шумом, как и акустика.

Некоторые считают, что рост промышленной продукции, обусловленный автоматизацией и общим увеличением скорости работы механизмов, сводится почти на нет из-за падения производительности труда, вызванного усилением шума. Это, возможно, преувеличение, но, без сомнения, снижая уровень шума на заводе, можно существенно поднять производительность труда рабочих. Борьба с шумом обходится так дорого, потому что требуется уменьшать уже существующий шум: переделать готовую машину или установку часто оказывается вдвое дороже, чем предусмотреть соответствующие меры по снижению шума еще в техническом проекте. Но если из-за шума, сопровождающего новый производственный процесс, завод должен будет приостановить работу по постановлению суда, то он понесет убытки во много раз большие, чем расходы, которые потребовались бы на своевременное снижение шума.

Человек достиг высокого уровня цивилизации, в частности, благодаря своей способности к общению, а связь посредством звуков — одна из двух основных форм общения людей. Шум препятствует этому общению, он обедняет нашу жизнь, снижает нормальную активность человека. Более того, шум может заглушить сигнал опасности, предостерегающий крик, и тогда не исключены роковые последствия. Очень часто первым признаком неисправности работающей машины служит появление необычного шума, который может быть предупреждением о всех возможных последствиях дефекта — от простой поломки до взрыва. Но если общий уровень шума на предприятии высок, такие сигналы пройдут незамеченными.

В последние годы мы стали свидетелями резкого усиления интереса к проблеме шума со стороны правительственных организаций, и это касается не только Англии, но и США и многих других стран. Англия одной из первых привлекла к борьбе с шумом законода-

тельство: в 1960 г. был опубликован Закон о снижении шума, в 1963 г. появился упомянутый выше отчет о проблеме шума, а в 1970 г. Антони Крослэнд, тогдашний министр жилищного строительства и местного самоуправления, учредил Консультативный комитет по борьбе с шумом. Когда в том же году было создано (в Англии. — *Ред.*) первое в мире Министерство по охране окружающей среды, комитет давал новому министерству рекомендации по выработке линии поведения и законодательной деятельности в области борьбы с шумом. Благодаря этому в принятый в 1974 г. Закон о контроле над загрязнением окружающей среды были включены новые многочисленные положения, касающиеся шума. В это же время в Министерстве труда был выработан Кодекс правил по уменьшению дозы шума, получаемой работающими по найму, а позже, на основе еще одного отчета — Закон об охране здоровья и безопасности труда, позволивший начать борьбу с профессиональным повреждением слуха. В Законе о государственной компенсации от 1972 г. шуму также уделено особое внимание и предусмотрены значительные ассигнования, в частности для устройства звукоизоляции в домах, подвергающихся действию шума, доносящегося с новых или улучшенных дорог, если шум превышает установленный уровень. Государственные средства вложены также в проект бесшумного пассажирского транспорта. И хотя это не слишком радостно, появление бесшумного авиационного мотора RB-211 привело к крушению старейшей компании Роллс-Ройс.

В результате указанной законодательной деятельности особенно возросла потребность в практических знаниях о шуме. Бессмысленно издавать законы, которые не получают применения. Для того чтобы осуществить надлежащий контроль и уменьшить государственные расходы на выплату компенсации, сейчас, как никогда прежде, необходимо научить разбираться в проблеме шума и возможностях борьбы с ним владельцев, конструкторов, администраторов. Даже если им не придется непосредственно заниматься технической стороной дела, они смогут понять, о чем идет речь и принять правильное решение своевременно, когда еще можно что-то исправить, а не после того,

как допущенная грубейшая ошибка заявит о себе шумом.

В первую очередь следует положить конец безответственности и невежеству. Научнообразные разговоры о децибелах больше не должны сбивать всех с толку, акустика должна занять свое место на переднем крае конструкторских работ и ее требования должны учитываться уже на стадии проектирования. Население необходимо ознакомить с существующими нормами, чтобы люди не мирились с излишним шумом. Инженерам следует изучить проблему шума настолько, чтобы знать, когда шум возможно ограничить, и разбираться в указаниях специалистов-акустиков. Соображения экономии больше не могут служить лимитирующим фактором при проектировании устройств для снижения шума: в частности, уже созданы авиационные двигатели, которые отвечают не только соответствующим техническим и экономическим требованиям, но и установленному предельному уровню шума.

И если мы хотим иметь более тихое будущее, подобную линию поведения должны проводить как промышленность в целом, так и правительство.

Воздух, волны, звук

Разумеется, шум — это просто один из видов звука. Обычно шум называют «нежелательным звуком», что в известной мере справедливо. Но то, что для одних ушей — шум, для других — музыка. Рев самолета, проносающегося над крышей дома, невыносим для несчастного жильца. Но как он радостен для жены летчика-испытателя, возвращающегося из первого полета! Так или иначе, всякий шум — это звук, и, прежде чем пускаться в изучение сложных методов ослабления шума, необходимо как следует понять, что же такое звук вообще.

Удивительно, что многие люди, изучавшие еще в школе звук, колебания и волны, сохранили впечатление, что волнистые линии на картинке в учебнике дают как бы «портрет» звуковой волны и что воздух заполнен невидимыми волнистыми линиями, исходящими от каждого источника звука. Все это, конечно, не так, и мы не сможем двигаться дальше, не уяснив природу звука.

Звук можно создать в любой среде. Мы привыкли наблюдать его в воздухе, но его можно обнаружить и в воде, и в бетоне и практически в любом твердом веществе, в любой жидкости, в любом газе; звука не может быть только в пустоте. Таким образом, прежде всего нам следует поговорить о свойствах среды, а так как большая часть звуков, которые мы слышим, приходит из воздуха, то в качестве примера нам лучше всего взять именно воздух. Если кому-либо трудно представить себе, что звук может приходиться не только из воздуха, пусть он прижмет свои ручные часы ко лбу: если вокруг тихо, то при достаточно остром слухе он услышит тиканье, звуки которого, минуя воз-

дух, прошли через металл часовой крышки и кости черепа.

Воздух упруг. Если эти слова вызывают у нас ассоциацию с резиной, а сходства между воздухом и резиной, как мы отлично знаем, никакого нет, то следует забыть привычный смысл этого слова и вспомнить, что, когда сжимают какой-либо объем воздуха, например в велосипедном насосе, воздух всегда стремится вернуться к прежнему состоянию. Именно это и означает слово «упругий»: если деформировать упругое тело, оно сопротивляется деформации и стремится восстановить свое исходное состояние. Свойство, обратное упругости — пластичность. И здесь опять же нужно представлять себе не пластмассовую миску для мытья посуды, а какое-либо вещество, которое после деформации сохраняет вновь приобретенную форму. Материал, из которого сделана миска, погому и называют пластмассой, что он «термопластичен», то есть обладает пластичностью в горячем состоянии (при охлаждении она утрачивается). Чтобы среда могла проводить звук, она должна быть упругой; в отсутствие упругости в среде невозможно волновое движение, которое и есть звук.

Предположим, желая привлечь внимание какого-то человека, я бросил в него камешек. Если человек особенно нечувствителен и первый камешек не производит впечатления — я могу бросить второй. Если человек решил не обращать внимания на мои выходы, то, вероятно, запас камней у меня скоро кончится. Но я могу применить более экономный способ обратить на себя внимание, — а именно, ткнуть в человека палкой. Преимущество этого способа заключается в том, что после каждого тычка палка остается у меня, и я смогу продолжать свои попытки до тех пор, пока либо не заставлю его взглянуть на себя, либо не получу сдачи! Замечательно, что эти два способа приставать к человеку принципиально различны: действуя с равными силами, я могу одинаково ушибить человека обоими способами, но, бросая камни, я передаю не только силу, но и множество камней, а вот когда я толкаю человека палкой, то не передаю ничего, кроме силы! Замечательно: уже удалось наставить человеку синяки, а палка как была у меня, так и осталась! При

этом от меня к нему не перешло ничего, кроме энергии. Точно так же, когда мы слышим издали шум летящего самолета, мы получаем от него только малое количество энергии, но никакие частицы воздуха от самолета к нам не долетают, и никакие волнистые линии не устремляются сквозь воздух. В этом суть волнового движения.

Следует отметить еще одно обстоятельство: когда человека толкают палкой, она попеременно то прикасается к его руке, то отходит от нее, скажем, на 100 мм. Она колеблется вперед-назад, вперед-назад, и такое колебание — еще одно неотъемлемое свойство волнового движения.

Однако мы еще не выяснили, почему упругость среды имеет столь существенное значение и каким образом энергия передается на расстояния гораздо большие, чем 100 мм, и притом с огромными скоростями.

Любое вещество — твердое, жидкое или газообразное — состоит из миллионов и миллионов крошечных молекул, расположенных, казалось бы, вплотную друг к другу. В действительности, однако, расстояния между молекулами не так уж малы по сравнению с их размерами, и молекулы удерживаются на этих расстояниях друг от друга благодаря действию сил, которое можно сравнить с действием пружин. Твердое вещество отличается от жидкости или газа только тем, что его молекулы образуют более или менее неизменную конфигурацию, а действующие между ними молекулярные силы велики. Однако в твердом веществе молекулы также отнюдь не остаются неподвижными — они непрерывно колеблются на «пружинах», связывающих их друг с другом. Чем более нагрето твердое тело, тем оживленнее движутся молекулы, а когда температура достигает точки плавления, твердое вещество превращается в жидкость¹. Как в твердых телах, так и в жидкостях молекулы, находящиеся на поверхности, не имеют сверху «партнеров», с которыми они могли бы образовать молекулярные связи,

¹ Некоторые твердые вещества сублимируют — непосредственно переходят из твердого состояния в пар: таковы, например, йод и сухой лед (твердая углекислота),

но тем сильнее они связываются с ближайшими к поверхности молекулами, и это приводит к появлению поверхностного натяжения. Если продолжить нагревание, движение молекул усилится, связи их с «соседями» станут мимолетными, поверхностное натяжение исчезнет и жидкость испарится. Разумеется, испарение происходит и при температуре ниже точки кипения, потому что всегда существует некоторый постоянный поток молекул, отрывающихся от поверхности жидкости случайно. Существенно, что, хотя молекулы газа не имеют определенных связей со своими соседями, на них все же действуют сложные силы упругого типа, которые снова свяжут их и обратят газ в жидкость или в твердое вещество, как только температура понизится и молекулы замедлятся. Молекулы нечувствительны к тому, какие именно другие молекулы становятся их соседями, но сильно реагируют на степень их близости.

Из сказанного становится ясно, каким образом твердые тела, жидкости и газы проявляют упругость при приложении напряжения — молекулы либо теснее сдвигаются, либо расходятся, а их пружиноподобные связи сжимаются или растягиваются. Как только напряжение снимается, «пружины» вернут молекулы в исходное положение равновесия. О молекулах газа правильнее сказать, что «пружины» не оттягивают их в прежнее положение, а раздвигают друг от друга на прежнее расстояние¹.

Теперь представим себе длинную, наполненную воздухом трубу, с одного конца которой вставлен поршень (рис. 1). Можно было бы предположить, что если поршень быстро вдвинуть внутрь трубы, то весь столб воздуха одновременно продвинется вперед, освобождая место для поршня. Однако произойдет нечто совсем другое. Молекулы воздуха, удерживаемые на некотором расстоянии друг от друга силами упругого типа, — это мельчайшие частицы вещества, и, следовательно, они обладают массой. Каждая молекула все-таки кое-что весит, а поскольку она

¹ Следует иметь в виду, что, обсуждая поведение молекул под действием звука, автор нигде не учитывает тепловое движение молекул. По существу, речь идет не о молекулах, а о частицах среды, содержащих множество молекул. — *Прим. ред.*

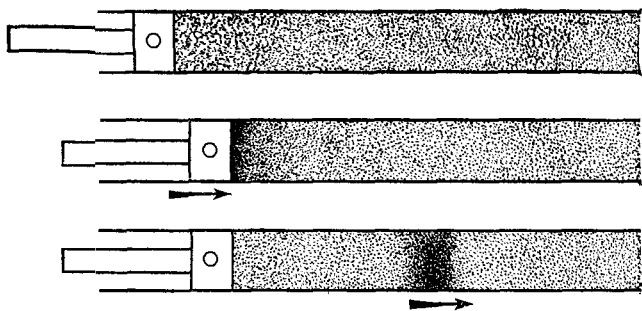


Рис 1. Действие движения поршня на молекулы воздуха в трубе.

обладает массой, она проявляет инерционные свойства. Припомним первый закон Ньютона: каждое тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока внешняя сила не выведет его из этого состояния. Например, как бы хорошо ни были смазаны петли тяжелой дубовой двери, чтобы закрыть ее, обязательно нужно приложить известное усилие, потому что из-за своей массивности она как бы сопротивляется и не приходит сразу в движение. Когда же она придет в движение, понадобится почти такое же усилие, чтобы ее остановить.

Подобным образом, но в малом масштабе сопротивляются изменению движения молекулы воздуха, ближайšie к поверхности поршня. Когда поршень вдвигается, инерция не позволяет этим молекулам мгновенно прийти в движение, поэтому «пружины», отделяющие их от поверхности поршня, сожмутся. Потенциальная энергия, сообщенная поршнем этим «пружинам», заставит молекулы двигаться вперед. Придя в движение, молекулы, обладающие определенной массой, приобретут кинетическую энергию; потенциальная энергия «пружин» превратится в кинетическую энергию молекул. Затем этот процесс повторится, молекулы первого слоя начнут толкать молекулы следующего слоя; вследствие инерции те также сопротивляются и приходят в движение только после того, как сожмутся «пружины», действующие между молекулами первого и второго слоев. Аналогичное яв-

ление (в гораздо более крупном масштабе) наблюдается, когда маневренный паровоз толкает на запасной путь состав железнодорожных вагонов. Вследствие инерции первого вагона — и в меньшей мере трения — пружины его буферов сожмутся, и только после того, как они запасут достаточную потенциальную энергию, первый вагон начнет катиться по рельсам. При этом он сожмет пружины буферов между первым и вторым вагонами и т. д.; в результате пройдет заметное время, прежде чем покатится также и последний вагон. Теперь легко понять, почему при быстром вдвигании поршня в трубу на небольшое расстояние весь воздушный столб в целом не приходит в движение мгновенно: каждому молекулярному слою нужно время, чтобы сдвинуть с места следующий слой. Потребуется целая секунда для того, чтобы на протяжении 344 м воздух продвинулся вдоль трубы на расстояние, пройденное поршнем. Если бы молекулы были тяжелее или молекулярные силы слабее, времени понадобилось бы больше. Расстояние в 344 м относится к температуре в 20°C ; при 0°C оно уменьшится до 332 м (с точностью до одного метра). Такое сокращение расстояния обусловлено тем, что при охлаждении молекулы сближаются, и, если бы мы могли подсчитать число слоев молекул воздуха в столбе длиной 344 м при 20°C , оно равнялось бы числу слоев в столбе воздуха длиной 332 м при 0°C ¹. Хотя при охлаждении молекулы воздуха сближаются, при одном и том же атмосферном давлении упругость «молекулярных пружин» останется прежней, поскольку интенсивность движения молекул при охлаждении соответственно уменьшится.

Все эти рассуждения вполне применимы и при движении поршня назад. В этом случае он не сжимает «пружины», а растягивает их до тех пор, пока ближайший к нему молекулярный слой не начнет также двигаться назад. Молекулы первого слоя, кинетическая энергия которых обусловлена этим движением, в свою очередь растянут «пружины», связывающие их со следующим слоем, и т. д. В результате, после того

¹ Здесь автор допускает ошибку: число слоев обратно пропорционально квадрату скорости звука, а не первой степени. — *Прим ред.*

как поршень сдвинулся сначала вперед, а потом назад, все молекулы вернутся на свои исходные места; при этом они, подобно палке, передадут «толчок», не получив в итоге никакого остаточного перемещения. В сущности, воздушный столб не так уже сильно отличается от палки. Если бы удалось выполнить соответствующее измерение, то оказалось бы, что и в палке для передачи «толчка» от одного конца к другому требуется несколько миллисекунд. В воздушном столбе на это уходит больше времени, но толчок поршня на одном конце столба непременно передастся на другой конец; в этом можно убедиться, натянув поперек трубы тонкую мембрану. Соединим поршень с коленчатым валом и начнем колебать поршень туда и обратно. Мембрана на другом конце воздушного столба будет повторять эти колебания, хотя и с запозданием, то есть с отставанием по фазе, потому что для передачи движения поршня от одного молекулярного слоя к другому требуется время. Все это можно описать иначе: можно сказать, что мембрана приводится в движение звуком, издаваемым поршнем! Однако невозможно действительно изготовить достаточно маленький коленчатый вал, так как смещение молекул воздуха в звуковой волне обычно ничтожно: когда мы слышим человека, говорящего обычным голосом, перемещение частиц воздуха вблизи нашего уха равно примерно диаметру молекулы водорода.

Если труба не слишком коротка, а движение поршня не слишком медленно, каждое колебание поршня будет доходить до мембраны не раньше, чем он успеет сделать по меньшей мере одно, а возможно, и несколько колебаний. Мы уже знаем, что если длина трубы равна 344 м, то для передачи на ее дальний конец движения или звуковой волны, вызванной колебанием поршня, потребуется одна секунда. Если поршень колеблется, совершая 100 циклов в секунду, то он за секунду попеременно 100 раз толкает воздух вперед и 100 раз — назад. Промежуток времени между двумя последовательными толчками составит $1/100$ с; за этот период действие первого толчка распространится вдоль трубы на 3,44 м. Следовательно, если бы удалось «заморозить» воздух в трубе и тут же его исследовать, мы увидели бы ряд сгущений

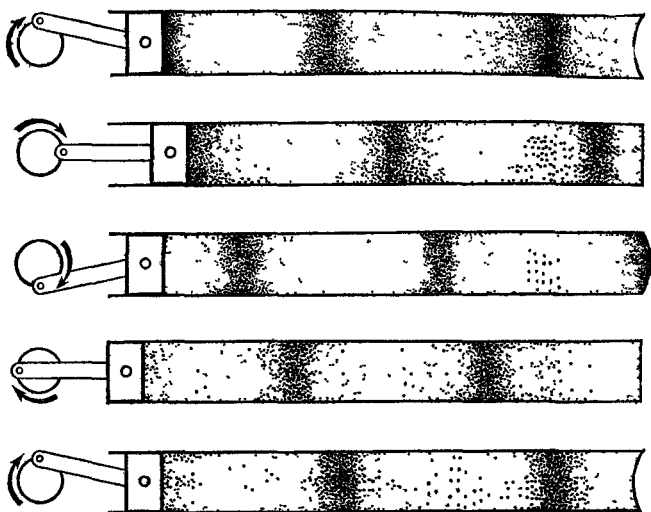


Рис. 2. Действие повторяющихся движений поршня на молекулы воздуха в трубе.

молекул, расположенных вдоль всей трубы с интервалом в 3,44 мм, и ряд разрежений (явление, обратное сгущению), расположенных посередине между сгущениями (рис. 2).

Если вместо того, чтобы «замораживать» воздух, мы могли бы проследить за отдельной молекулой, то обнаружили бы, что она колеблется точно так же, как поршень. Если бы молекула, выбранная нами для наблюдения, отстояла от исходного положения поршня на 3,44, 6,88, 10,32 или любое другое число метров, кратное 3,44, ее колебания точно совпадали бы по фазе с колебаниями поршня. Если бы молекула находилась точно посередине между любыми из этих точек, она двигалась бы точно противоположно движению поршня, что соответствует сдвигу по фазе на 180° , или на $3,14$ (π) радиан. Движение поршня, качнувшегося вперед и назад, можно рассматривать как полный цикл кругового движения. Это позволяет указывать положение любой промежуточной точки в угловой мере, пользуясь так называемым фазовым углом, выраженным в градусах или радианах ($360^\circ = 2\pi$, или 6,28 радиан).

Теперь мы можем уже утверждать не только то, что колебания мембраны на конце трубы вызваны звуком, издаваемым поршнем, но и что частота этого звука равна 100 герц (сокращенно Гц — единица, означающая «один цикл в секунду»), а длина волны равна 3,44 м. Итак, наконец, выясняется, что представляют собой волнистые линии, о которых мы говорили выше, — это просто графики, показывающие давление воздуха — выше или ниже атмосферного — либо в различных точках, расположенных последовательно вдоль трубы в определенный момент времени, либо в определенной точке в последовательные моменты времени. Эти линии изображают периодическое чередование сгущений и разрежений молекул, которые и образуют звуковые волны.

Звук, бегущий по трубе, — это частный случай, но все изложенные здесь положения носят общий характер. Разумеется, на открытом воздухе звук не передается вдоль одной прямой. Вообразим вместо трубы и поршня открытое пространство и маленький круглый баллон, соединенный с насосом, как это показано¹ на рис. 3. Если воздух попеременно накачивать в баллон и откачивать из него, баллон будет расширяться и сжиматься. При расширении действие баллона на окружающие молекулы воздуха сходно с действием движущегося вперед поршня на молекулы воздуха в трубе. «Пружины», отделяющие молекулы от баллона, сожмутся, и молекулы отойдут дальше; двигаясь, они сожмут «пружины», действующие между ними и молекулами следующего сферического слоя, и т. д. При сжатии баллона этот процесс повторяется в обратном порядке. Единственное принципиальное различие между рассмотренными случаями возникновения звуковых волн состоит в том, что в трубе сжимаются или растягиваются последовательно расположенные плоские слои молекул (так как волны сжатия, бегущие вдоль трубы, — это плоские волны), тогда как вокруг баллона колеблющиеся молекулы воздуха образуют сферические слои. Это, однако, очень суще-

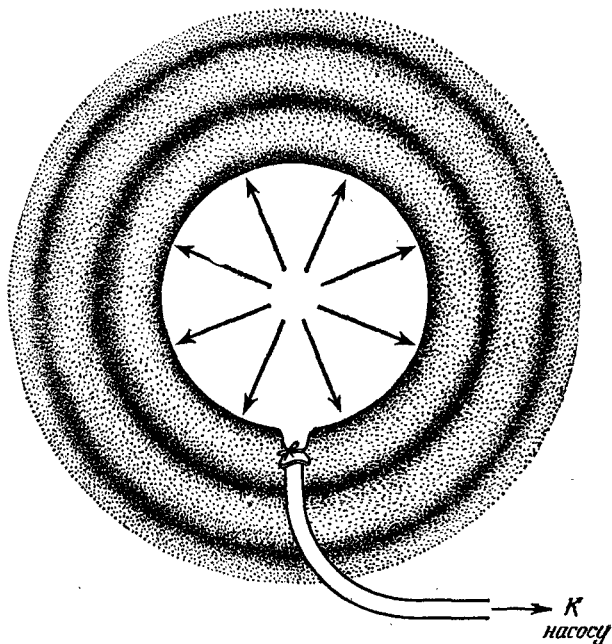
¹ На этом рисунке масштаб не соблюден: размеры баллона в поперечнике должны быть много меньше длины звуковой волны. — *Прим. ред.*

ственное различие, в чем мы убедимся позже, когда будем говорить о роли расстояния от источника звука.

Мы показали, что частота звука совпадает с частотой колебания источника. Поршень, совершающий 100 колебаний в секунду, создает звуковые волны с частотой, равной 100 Гц. Длина звуковой волны зависит как от скорости, с которой волны сжатия бегут по трубе (скорость звука), так и от частоты колебаний источника. С увеличением частоты колебаний поршня длина волны изменяется обратно пропорционально частоте: при 200 Гц длина волны равна 1,72 м, а при 400 Гц — 0,86 м. Математически эту зависимость можно выразить так:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где λ — длина волны, c — скорость звука, f — частота.



Р и с. 3. Действие пульсирующего баллона на молекулы воздуха.

Частота звука обычно представляет больший интерес, чем длина волны. Как мы увидим в следующей главе, высота звука для слушателя определяется в основном частотой, и, если длина волны изменится (например, в результате изменения температуры), высота звука останется прежней. Нота с частотой 1000 Гц будет звучать на Северном полюсе так же, как и в пустыне Сахара. Если вы смогли бы сыграть на трубе и в Арктике, и в Африке, то звуки получились бы разные, но только потому, что изменение скорости звука изменит резонансные частоты трубы.

Единственное, что может изменить высоту звука от источника, колеблющегося с постоянной частотой, — это изменение относительной скорости источника и слушателя. Наверное, многие замечали, как резко падает высота звука мотора проносящегося мимо автомобиля. В действительности ни с приближением, ни с удалением автомобиля частота излучаемого звука не меняется. Но представьте себе, что вы стоите около ленточного транспортера, движущегося со скоростью 1 м/с, на котором установлены ящики. Грузчик ставит ящики на транспортер по одному в секунду, так что они проходят мимо вас также по одному в секунду. Если грузчик начнет двигаться по направлению к вам со скоростью, скажем, 0,5 м/с, то относительно него скорость движения транспортера уменьшится до 0,5 м/с. Если на ходу он будет продолжать ставить ящики на транспортер с прежней частотой — по одному в секунду, окажется, что расстояние между ящиками составит только 0,5 м. Следовательно, теперь ящики будут проходить мимо вас вдвое чаще, чем грузчик ставит их на транспортер. Если бы грузчик удалялся от вас со скоростью 0,5 м/с, создалась бы обратная ситуация.

Точно так же, если источник испускает звуковые волны с частотой 100 Гц и эти волны бегут со скоростью 344 м/с, вы услышите звук частотой 100 Гц. Если источник приближается к вам со скоростью, предположим, 34,4 м/с, длина звуковой волны уменьшится на 10%. За 1 с до вас будет доходить на 10% больше звуковых волн, и, следовательно, вы услышите звук частотой 110 Гц; если источник звука с такой же скоростью удаляется, до вас дойдет на 10% меньше зву-

ковых волн и вы услышите звук частотой 90 Гц¹. Это явление называют эффектом Доплера, оно играет большую роль, в частности в астрономии, где по «смещению Доплера» в электромагнитном спектре звезд измеряют скорости их движения.

Мы должны познакомиться с еще одним очень важным свойством звуковой волны — ее формой. Вернемся к волнистой линии, то есть к графику распределения звукового давления в какой-то определенный момент в точках, расположенных последовательно вдоль направления движения волны, или в фиксированной точке в последовательные моменты времени. Рассмотрим звук постоянной частоты, например 1000 Гц. Что за график мы получим? Разделив скорость звука на частоту, можно определить длину волны, а мы уже знаем, что звук одной частоты состоит из правильных чередований сгущений и разрежений. Какую же форму имеет волна во всем интервале? Будем искать простейшую форму повторяющегося движения. Первое, что приходит в голову, — это вращение, но оно не разрешит стоящей перед нами задачи: движение по кругу не применимо к движению частиц вперед-назад по прямой линии. А может все-таки применимо? Если вращать гирьку, подвешенную на веревке, и смотреть на нее сбоку, мы увидим не вращение гирьки, а только ее движение вверх и вниз. Глядя таким образом, мы обнаружим, что смещение гирьки от центра изменяется как синус угла, описываемого веревкой. Такое движение называют «синусоидальным»: этим указывают, что оно изменяется подобно тригонометрической функции — синусу.

Синусоидальное движение чаще называют простым гармоническим движением (ПГД), и звуковая

¹ Здесь автор допускает ошибку: при движении источника звука со скоростью v вдоль прямой, соединяющей источник и приемник, слышимая частота f' равна частоте f испускаемого звука, деленной на $(1 - v/c)$ или на $(1 + v/c)$, в зависимости от того, приближается или удаляется источник, соответственно. В рассмотренном случае слышимый звук будет иметь частоту 111 Гц при приближении источника и 91 Гц при его удалении. Формула $f' = f(1 \pm v/c)$, примененная автором, справедлива для случая движения приемника, а не источника. При малых по сравнению со скоростью звука скоростях движения разница между этими случаями мала. — Прим. ред.

волна, испускаемая источником, совершающим колебания типа ПГД, является самым чистым звуком из возможных и единственным видом волны одной-единственной частоты. Возвращаясь к нашей волнистой линии, мы без труда обнаружим, что она имеет синусоидальную форму. Существуют веские, хотя и сложные математические обоснования того, почему синусоидальные колебания представляют собой самый важный вид осцилляций, или колебаний. Любое упругое тело, совершающее свободные колебания, создает именно синусоидальные волны. Однако очень редко тело колеблется так правильно, что порождает только одну беспримесную синусоидальную волну; обычно к такой синусоидальной волне присоединяется целый ряд других волн меньших амплитуд.

Поэтому чистые тоны встречаются на практике очень редко — почти все звуки, которые мы слышим, гораздо сложнее и состоят из большого числа тонов, звучащих одновременно. Как это отражается на графике? Ответ на этот вопрос дает самая простая арифметика, но более научно звучит термин «метод суперпозиции». Чтобы вычертить график давления звуковой волны, которая состоит из двух или более простых тонов, или синусоидальных волн, достаточно сложить (или вычесть) соответствующие значения давления каждой волны в каждой точке и результат нанести на чертеж. Таким путем можно комбинировать любое число простых волн, получая в итоге волны очень интересной формы. Результирующая форма волны зависит не только от частот составляющих синусоидальных волн, но также и от соотношения между их амплитудами и фазами.

Хотя на первый взгляд это представляется невероятным, но в действительности любую непрерывную периодическую волну можно представить в виде суммы ряда синусоидальных волн соответствующих частот и амплитуд. Первым это доказал французский ученый Ж. Фурье, когда он разрабатывал теорию распространения тепла. Однако его книга «Аналитическая теория тепла», опубликованная в 1822 г., приобрела гораздо более общее значение благодаря очень существенной теореме, в ней содержащейся. Полностью теорема Фурье звучит так: каждое конечное и

непрерывное периодическое движение можно разложить в простой ряд синусоидальных волн с соответственно подобранными фазами и амплитудами.

В дальнейшем эта теорема окажется нам чрезвычайно полезной, и поэтому важно понять ее точный смысл. Рассмотрим ее на простейшем примере прямоугольной волны (рис. 4), хотя такие волны встречаются не в акустике, а в электронике. Глядя на рис. 4, трудно вообразить, что эту столь отличную от синусоидальной волну можно представить в виде ряда синусоидальных волн. Тем не менее это возможно, правда, в виде бесконечного ряда. Если, как показано на рис. 4, начать построение компонент с синусоидальной волны той же частоты, что и прямоугольная волна, но несколько большей амплитуды и затем прибавить волну утроенной частоты с амплитудой, равной одной трети первой волны, то прямоугольная форма начнет выявляться. Далее прибавим синусоидальную волну пятикратной частоты и амплитуды, равной одной пятой от амплитуды первой волны, и т. д.; когда мы дойдем до волны с пятнадцатикратной частотой и амплитудой, в пятнадцать раз меньшей, чем амплитуда первой волны, то форма результирующей станет очень похожей на исходную прямоугольную волну. Интересно отметить, что если график анализируемой волны содержит крутые изгибы и изломы (например, прямые углы рассмотренной выше волны), то высокочастотные компоненты ряда Фурье будут иметь значительно большие амплитуды, чем для волны более плавных очертаний.

Как это ни представляется странным, но точно тем же способом, каким мы производили построение прямоугольной волны из ряда синусоидальных волн, можно осуществить и обратное — разложить в подобный ряд любую конечную, непрерывную и периодическую волну. Полностью значение этого обстоятельства выяснится позже.

Разумеется, воздух не единственный передатчик звуковых волн, и практически любой газ, твердое тело или жидкость ведут себя подобным же образом и тоже могут передавать звуковые волны. Но хотя основные законы распространения звука в разных средах одни и те же, такие величины, как, например,

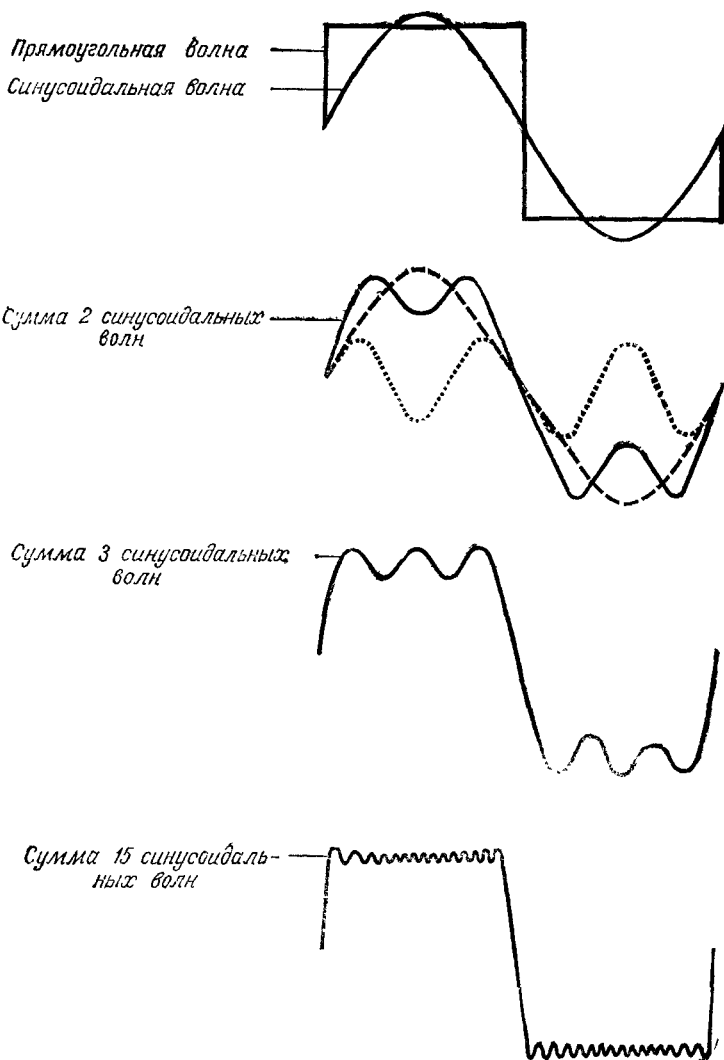


Рис. 4. Формирование волны прямоугольной формы.

упругость и плотность среды, различаются в широких пределах, что прежде всего отражается на скорости звука. Так, в большинстве твердых тел скорость звука по крайней мере втрое больше, чем в воздухе. Это связано с тем, что скорость звука пропорциональна корню квадратному из отношения соответствующего коэффициента упругости к плотности среды. Чем больше это отношение, тем больше скорость звука. В алюминии скорость звука при 15°C равна 5200 м/с , то есть более чем в 15 раз превышает скорость звука в воздухе; в стали при той же температуре скорость звука равна 5050 м/с . Если мы приложим ухо к одному концу длинной стальной трубы, то при ударе по другому ее концу сначала услышим ухом, приложенным к трубе, удар, переданный металлом трубы, а потом другим ухом — второй удар, принесенный волной, прошедшей через воздух. Эта вторая волна на прохождение того же расстояния затратит в 15 раз больше времени.

Акустики прошлого века приняли этот метод для определения скорости звука в твердых телах; предварительно они нашли скорость звука в воздухе, измеряя время между наблюдением вспышки и приходом звука от взрыва, происшедшего на большом расстоянии. Затем достаточно было измерить промежуток времени между двумя приходами звука от удара, произведенного по дальнему концу очень длинной трубы или бруса. Первым произвел такое измерение в 1808 г. француз Био, который воспользовался чугунной трубой длиной в целый километр. Чтобы на таком расстоянии расслышать звук, приходящий по воздуху, пришлось на дальнем конце трубы закрепить колокол. Сходный, но более трудный эксперимент произвели физики Колладон и Штурм для определения скорости звука в воде. На Женеvском озере они опустили под воду колокол и одновременно с ударом по нему взрывали небольшой заряд пороха. При этом они измеряли время между моментом появления вспышки и приходом звука от колокола. Во всех этих опытах время измерялось с помощью секундомера, и поэтому результаты были не слишком точны. При измерении гораздо более тонкими методами скорость звука в пресной воде при 15° оказалась равной 1440 м/с .

В дальнейшем мы увидим, что во многих проблемах шума звук, распространяющийся в твердых телах, играет ничуть не меньшую роль, чем звук, бегущий в воздухе; в частности, внутри зданий заметная доля шума часть своего пути проходит в твердом теле. Частота одного и того же звука в твердом теле и воздухе всегда одинакова, но вследствие большей скорости звука в твердых телах длина звуковой волны в них гораздо больше, чем в воздухе. Впрочем, длина звуковой волны в твердых телах обычно представляет интерес только при вычислении резонансных частот в конструкциях.

Шипение, свист, гудение, грохот

Надеюсь, я не слишком разочарую читателя, который уже мнит себя знатоком по части труб с поршнями и пульсирующих баллонов, если скажу ему, что, по всей вероятности, ни те, ни другие ему нигде не встретятся, разве только в какой-нибудь лаборатории. Реальные источники звука гораздо сложнее, чем эти схемы. В книге, посвященной шуму, возможно, и следовало бы начать с пневматических перфораторов и сверхзвуковых самолетов, но, соблюдая последовательность, мы в первую очередь остановимся на некоторых простых звуковых «машинах», применение которых не ограничено рамками лабораторий. В этих устройствах происходит большинство процессов образования шумов, которые так нам досаждают. Речь пойдет о музыкальных инструментах. В них применены наилучшие способы создания звуков, и, познакомившись с ними, мы по крайней мере будем знать, чего следует избегать при конструировании различных механизмов.

Музыкальные инструменты, как и многие другие источники звука, можно разбить на три группы: инструменты, звучание которых обусловлено аэродинамическими процессами, инструменты, создающие звук путем поддержания незатухающих механических колебаний, и инструменты, звучащие при ударе или при соударении тел. Все они могут служить прекрасными объектами для нашего исследования. Музыкальные инструменты из деликатности почти никогда не причисляют к источникам шума, а их тщательно разработанная конструкция исключает создание каких бы то ни было звуков, кроме предусмотренных певучих звучаний. Кроме того, при игре на музыкальных



Р и с. 5. Блок-флейта (в разрезе).

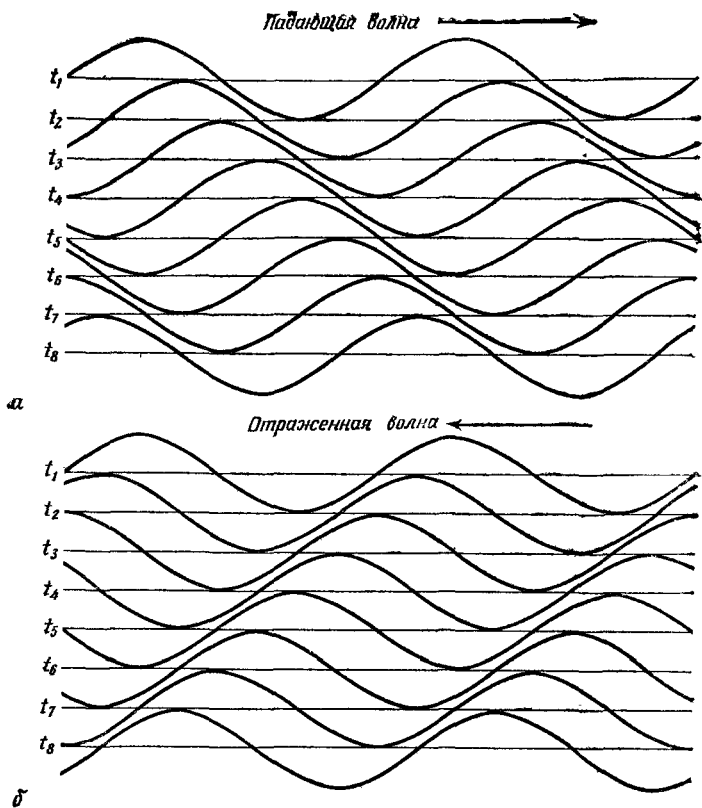
инструментах почти всегда стремятся к их гармоничному созвучию. У каждого музыкального инструмента найдутся двойники среди шумящих машин.

Примерами инструментов первой группы (издающих звуки аэродинамически) могут служить некоторые духовые инструменты, в частности блок-флейта (продольная флейта, или рекордер) и диапазонные органные трубы. Произвести звук без подачи энергии невозможно. Мы уже видели, что звук — это просто способ передачи энергии сквозь воздух или какую-либо другую среду в виде волн давления, в которых энергия непрерывно и быстро переходит из одной формы в другую: из потенциальной в кинетическую и обратно. При колебании поршня в трубе энергию поставлял вращающийся коленчатый вал, в случае пульсирующего баллона — насос. В духовой инструмент энергию подает сам музыкант, который давлением своих легких вдвухает в него модулированную струю воздуха. На рис. 5 изображена блок-флейта. Воздух, сжатый в легких, вдвухается через узкую щель мундштука и выходит из него в виде короткой струи; при этом то по одну, то по другую сторону от струи образуются вихри. Они возникают потому, что по обе стороны от быстро движущегося потока воздуха давление падает. Это можно увидеть, например, если дунуть на монетку, лежащую на столе: монетка перевернется. Падение давления вызывает отсасывание струи с боков; поэтому большая скорость воздуха, выходящего из мундштука, и турбулентность струи приводят к образованию вихрей. Затем эти вихри сталкиваются с клиновидным выступом амбушюра флейты и проходят сверху или снизу выступа. Практически именно положение этого выступа определяет частоту образования вихрей: чем меньше расстояние от отверстия мундштука до выступа, тем чаще образуются вихри. Точно так же, чем сильнее дует музыкант, тем больше скорость воздушной струи и частота образования вихрей.

Образование вихрей и прохождение их то по одну, то по другую сторону от клиновидного выступа вызывает колебания давления в ближайших слоях воздуха. Если распилить блок-флейту сразу же позади выступа, издаваемый ею звук окажется весьма немusыкальной смесью из шипения и свиста, и его высота будет зависеть от силы, с которой музыкант дует в мундштук. В этом случае колебания давления далеко не такие простые, как при пульсациях баллона, но принцип возникновения звука тот же. Расширяясь и сжимаясь, баллон сжимает и разрезает окружающий сферический слой воздуха; это вызывает колебания давления, передаваемые во всех направлениях от одного слоя к другому со скоростью звука. Различие между баллоном и отпиленным мундштуком блок-флейты состоит в том, что последний производит сжатия и разрежения не путем колебания поверхности, а в результате колебаний самого воздуха и что возникающие при этом волны не имеют правильной сферической формы.

Почему мы отпилили мундштук от нашей блок-флейты? Только потому, что остальная часть инструмента не имеет никакого отношения к созданию звука, а только видоизменяет звук, возникающий в мундштуке. Если закрыть отверстия в стенке корпуса инструмента, он будет напоминать трубу, в которой ходит поршень. Но в предыдущей главе мы опустили одно важное обстоятельство, касающееся поведения такой трубы с поршнем. Предполагалось, что волны сжатия, бегущие вдоль трубы, исчезают, добрав до ее конца. В действительности это вовсе не так. Когда звуковая волна достигает открытого конца трубы, она внезапно встречает бесконечный объем воздуха в неограниченном наружном пространстве. Ничтожный объем воздуха, который волна переместит из узкой трубы в наружное пространство, не в состоянии повысить давление снаружи и поэтому волна не сможет выйти наружу, а, отразившись от открытого конца трубы, побежит в обратную сторону. Явление отражения звука играет важнейшую роль в акустике, и мы рассмотрим его гораздо подробнее в дальнейшем.

Отраженная волна бежит обратно по трубе. В блок-флейте она вскоре наталкивается на мундштук,



Р и с. 6. Прямая (а) и отраженная (б) волны.

где снова отражается, опять бежит вперед, и этот процесс последовательных отражений продолжается, причем звуковая энергия почти полностью остается внутри трубы, и при каждом отражении теряется лишь малая ее часть.

На рис. 6, а показано распределение давлений в исходной волне для последовательных моментов времени $t_1, t_2 \dots t_8$, показывающее перемещение волны вдоль трубы в течение одного периода. На рис. 6, б изображено перемещение в обратную сторону первой отраженной волны для тех же моментов времени. Обе волны существуют в трубе одновременно, накладыва-

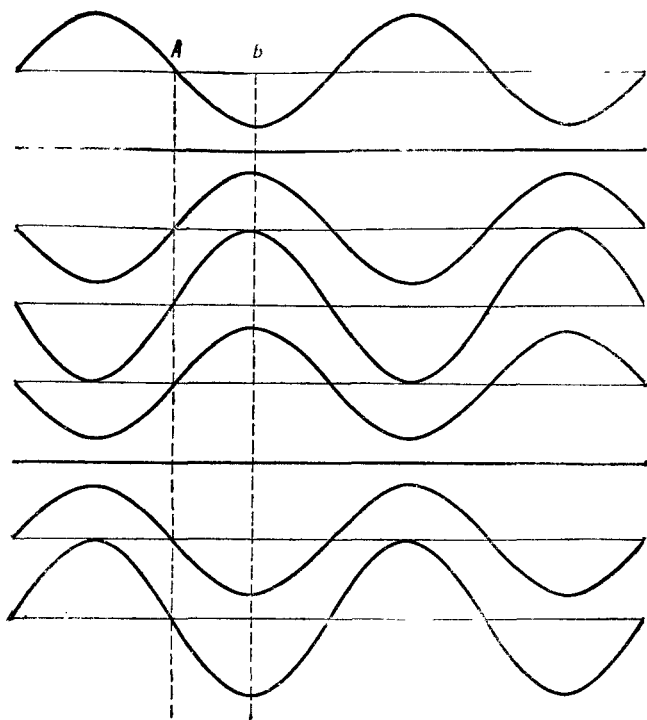


Рис. 7. Стоячая волна — сумма бегущих волн, показанных на рис. 6.

ваясь одна на другую. Чтобы получить результирующую картину, волны следует сложить согласно принципу суперпозиции. При этом выясняется нечто удивительное: в результате никакого движения волн ни в одну, ни в другую сторону не получается — образуется одна стоячая волна (рис. 7). В такой стоячей волне распределение звукового давления уже не перемещается ни вправо, ни влево: в каждой точке звуковое давление изменяется периодически, с различными амплитудами для разных точек. Например, в точке *A* амплитуда волны всегда равна нулю, а в точке *B* всегда максимальна. А в бегущей волне изменения давления имели одинаковую амплитуду во всех точках и давление достигало одного и того же максимума,

хотя и в разные моменты времени и различных точках по длине трубы. После первого отражения наступает второе и т. д., и волна, подобно челноку, продолжает бегать вперед-назад, и отражения, складываясь, увеличивают амплитуду стоячей волны, пока более ранние отражения не затухнут в результате поглощения звуковой энергии

Взглянув снова на график стоячей волны, мы обнаружим еще одно существенное обстоятельство: на открытых концах трубы всегда оказываются минимумы (нулевые значения) амплитуды. Следовательно, вдоль трубы всегда должно уложиться целое число полуволн звука. Тогда, действительно, в результате последовательных отражений амплитуда стоячей волны достигает значительной величины: происходит резонанс. При резонансе отраженные волны комбинируются так, что усиливают друг друга — это так называемая конструктивная интерференция волн. Если же на длине трубы не укладывается целое число длин волн, то последовательные отражения уже не будут усиливать друг друга; максимумы одних волн придутся на минимумы других, и в итоге получится стоячая волна малой амплитуды. Резонанс в этом случае отсутствует, и говорят о деструктивной интерференции волн.

Теперь откроем отверстия в стенке блок-флейты. Мы видели, что стоячие волны возникают в результате отражения волны от обоих концов трубы; отражение происходит благодаря внезапности столкновения волны со свободным наружным воздухом. Если открыть отверстие, то такое же отражение возникнет уже ближе к началу блок-флейты, звуковая волна столкнется с наружным воздухом несколько раньше, эффективная длина трубы уменьшится, а значит, ее резонансная частота возрастет.

Снова приложим мундштук к корпусу блок-флейты и подуем в него. Каждый, кто пробовал играть на духовых инструментах, знает, что не всегда достаточно взять мундштук в рот и подуть, чтобы получить желаемый звук, на который рассчитывал изготовивший инструмент мастер. Пусть при всех закрытых отверстиях дискантовая блок-флейта издает звук F (фа) выше среднего C (до). Если только выступ амбушюра

находится в правильном положении, то частота возникновения вихрей, о которых говорилось выше, будет зависеть от силы, сообщаемой воздушной струе. При закрытых отверстиях корпус блок-флейты представляет собой трубу, резонирующую на частоте 349 Гц. Опытный флейтист дует с силой, необходимой для формирования примерно 349 вихрей в секунду; поэтому возникающие колебания давления вызовут колебания воздуха в корпусе блок-флейты почти так же, как это происходило при движении поршня в трубе. Будучи резонатором, корпус блок-флейты усиливает каждую бегущую вдоль него волну с частотой 349 Гц и длиной чуть меньше одного метра.

Самой низкой частоте резонанса закрытой трубы соответствует длина волны звука, вдвое большая, чем длина трубы. В нашем частном случае длина инструмента должна быть чуть меньше 0,5 м. Резонанс в трубе обеспечивает обратную связь и вызывает образование вихрей точно в такт с резонансной частотой, если только флейтист не дует слишком сильно или слишком слабо. Когда отверстия в корпусе инструмента открыты, резонансная частота возрастает, но в остальном процесс протекает так же; флейтист подсознательно варьирует силу, с которой он дует, таким образом, чтобы ускорить образование вихрей, чему способствует и действие обратной связи. Если он будет дуть слишком сильно, то прежде всего слегка увеличится частота звука, издаваемого блок-флейтой, потому что, когда частота образования вихрей близка, но несколько превышает резонансную частоту корпуса, результирующая частота резонанса равна среднему между ними. Если флейтист подует еще сильнее, блок-флейта протестующе взвизгнет (в действительности все происходящее сложнее, и в этой главе мы еще вернемся к данному вопросу).

Рассмотрим теперь вторую группу музыкальных инструментов и попробуем сравнить их с блок-флейтой. К этой группе относится семейство скрипок; скрипка позволяет познакомиться со многими возможными механизмами образования шума.

Как это ни странно, но легче всего непосредственно сравнить между собой принципы действия скрипки и блок-флейты, хотя они и относятся к разным группам

музыкальных инструментов. Струны скрипки можно уподобить корпусу блок-флейты, то есть резонирующей трубе. В такой трубе исходное возмущение создается на одном ее конце, но это не обязательно: возмущение можно вызывать в любой точке внутри трубы. Натянутая струна также способна резонировать. В этом легко убедиться, если дернуть натянутую резиновую ленточку. Правда, громкого звука при этом не получится, потому что ленточка слишком тонка и не способна создать значительные колебания в окружающем воздухе. Как показано на рис. 8, при отклонении струны воздух не сжимается, а обтекает струну. Но это побочное обстоятельство, и оно не снижает значения того факта, что струна обладает резонансными свойствами.

Вспомним, что основной физический процесс при распространении звуковой волны, — это непрерывный переход кинетической энергии в потенциальную и обратно. То же самое происходит и при колебании струны: когда струну дергают, отклоняя ее в одну сторону, она растягивается и приобретает потенциальную энергию; когда струну отпускают, сила натяжения стремится вернуть ее в положение равновесия, струна приобретает кинетическую энергию и импульс и, минуя по инерции положение равновесия, отклоняется в другую сторону, то есть снова в положение, в котором струна имеет потенциальную энергию, и т. д. Такие колебания совершаются до тех пор, пока струна

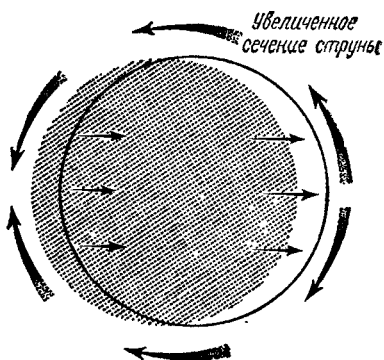


Рис. 8. Обтекание воздухом колеблющейся струны.

не истратит всю энергию, сообщенную ей при оттягивании.

Впрочем, существует и другой, более научный подход к колебанию струны, позволяющий выявить сходство струны с трубой. Если взять очень длинную слаботянутую струну и ущипнуть ее у одного конца, то созданное щипком смещение побежит вдоль струны, подобно звуковой волне в длинной трубе. И точно так же, достигнув конца струны, смещение отразится и побежит в обратную сторону. Если вместо однократного щипка непрерывно возбуждать колебания струны, отраженная волна будет накладываться на исходную и струна будет выглядеть подобно подвижному графику стоячей волны в трубе. Учитывая последовательные отражения от обоих концов струны, можно понять, каким образом струна совершает резонансные колебания такие, как воздух в трубе, с тем отличием, что пучности и узлы соответствуют не точкам большого и малого давления, как в трубе, а точкам максимального и нулевого смещений. Резонансная частота струны также обратно пропорциональна ее длине.

Подобно тому как можно варьировать резонансную частоту трубы, изменяя плотность или упругость газа, ее заполняющего, и таким образом изменяя скорость звука, а следовательно, длину звуковой волны, можно варьировать и резонансную частоту струны. Аналогия состоит в том, что, увеличивая массу струны или уменьшая ее натяжение при постоянной длине струны, можно уменьшить ее резонансную частоту, и наоборот. В этой возможности не отдавали себе отчета до XVII в., что чрезвычайно задержало появление современного фортепьяно. Для того чтобы сохранить диапазон в семь с половиной октав, которым располагает современный инструмент, рояль со струнами, обладающими одинаковой погонной плотностью и равным натяжением, должен был бы иметь длину более 12 м.

В скрипке аналогом образования вихрей в блок-флейте служит колебание струны, создаваемое движением смычка, натертого канифолью, поперек струн. При звучании какого-либо тона здесь также имеет место действие обратной связи, подгоняющее частоту

колебания струны под смычком к частоте прозвучавшего тона. К сожалению, играть на скрипке — это не значит просто держать ее под подбородком и водить по ее струнам смычком. Но теперь нам уже легче понять, почему начинающий скрипач извлекает из своего инструмента столь душераздирающие звуки: если исходное возмущение, вызываемое в струнах смычком, не достаточно точно совпадает с резонансной частотой струны (а такое совпадение зависит от давления на струны и скорости движения смычка), то результирующий звук будет очень сходен с визгом блок-флейты, в которую дуют с излишней силой.

Как уже упоминалось, сами по себе струны не могут издавать сильных звуков. Однако они колеблются весьма энергично. Струна обладает энергией, и ее движение имеет колебательный характер, что достаточно для создания звука, но передача звука от струн в воздух очень мала. Это затруднение устраняет корпус скрипки: через подставку колебания струны передаются деревянному корпусу, который действует как наш воображаемый пульсирующий баллон, с той разницей, что звуковые волны создаются не только снаружи, но и внутри корпуса. Корпус усиливает передачу звука в воздух, так как на воздух воздействует поверхность гораздо большая, чем поверхность струны. Звуковые волны, возникающие внутри корпуса, комбинируются друг с другом, но скрипичный мастер должен рассчитать корпус таким образом, чтобы резонансная частота внутреннего объема скрипки была ниже частоты самой низкой ноты любой струны, иначе какая-то из нот будет доминировать над остальными. Иногда мастеру это не удается, и тогда у скрипки появляется так называемый «волчий тон». Резонансы — бич плохих скрипок.

Перейдем к третьей группе инструментов — инструментам, работающим от удара или соударений тел. В голову сразу приходит мысль о медных тарелках оркестра и барабанах. В качестве примера рассмотрим тарелки. Барабаном мы займемся отдельно в главе 8. У тарелки много общего с колеблющейся струной. Теоретически струна, совершающая колебания, представляет собою одномерную систему: нас интересуют только длина ее и расстояние, на которое она

отклоняется от положения равновесия. Во многих отношениях тарелку можно рассматривать как двумерную струну. Заставить струну колебаться можно не только скольжением смычка, но и щипком или ударом. То же можно сказать и о тарелке, хотя вряд ли нам когда-либо придется увидеть, как играют смычком на тарелке; но клоуны, которые извлекают музыкальные звуки из стальной пластинки, водят по ее краю смычком («поющая пила»), — заурядный номер цирковой программы.

Если ударить по медной тарелке, в металле побегут изгибные волны, которые отразятся от краев, подобно тому как отражаются волны в струне. Разумеется, тарелка не находится в состоянии натяжения, но роль натяжения играет упругость металла. Тарелка гораздо успешнее, чем струна излучает звук в воздухе; это обусловлено ее большой плоской поверхностью: ведь только по краям тарелки воздух может обогнуть ее и не подвергнуться сжатию или разрежению.

Существует еще один очень важный аспект генерации звука, которого мы пока не касались. Мы уже выяснили, что такое звук, как он создается и как его можно усилить; мы рассмотрели блок-флейты, скрипки и тарелки, сравнили их друг с другом, но не объяснили, почему звуки, извлекаемые из них, лишены даже отдаленного сходства. Эти инструменты представляют собой превосходные примеры «механизмов», производящих звук; подобные механизмы можно обнаружить в любой шумной машине. И все-таки, сколько бы скрипок ни играло одновременно, пусть даже как угодно плохо и громко, они никогда не будут звучать так, как пневматическое сверло!

Чтобы объяснить, почему это происходит, вернемся к колеблющейся струне, закрепленной для лучшей слышимости звука на резонансной деке. Если осторожно прикоснуться к середине колеблющейся струны, издаваемый ею звук повысится на октаву. На первый взгляд кажется, что причина такого повышения очевидна — мы вдвое уменьшили длину струны, следовательно, вдвое снизили длину волны и удвоили частоту звука. Однако правильное объяснение таково: приложив палец к струне, мы остановили ее

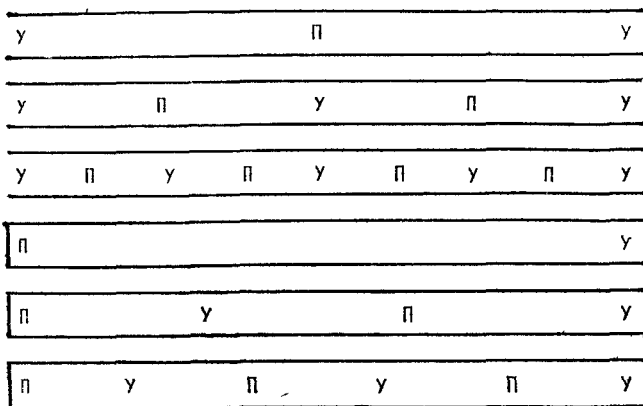


Рис. 9. Расположение узлов (У) и пучностей (П) в резонирующих трубах (ряд можно продолжать бесконечно).

колебание с основной, или резонансной, частотой, и при этом обнаружилось, что все время струна колебалась с множеством еще и других частот; эти другие колебания называют обертонами или гармониками. Все приводимые раньше примеры были в той или иной мере искусственными, потому что очень редко создается звук, состоящий только из одной частоты.

Как мы уже видели, трубы и струны резонируют на частотах, определяемых их длиной, потому что на концах трубы или струны всегда должен оказаться узел или пучность. Однако узлы или пучности придутся на концы трубы или струны и при частотах, кратных основной частоте; при этом только увеличится общее число узлов и пучностей (рис. 9). Следовательно, и на этих кратных частотах также возможны резонансные колебания. Действительно, каждая музыкальная нота, за редким исключением, состоит не только из своей основной частоты, но еще из довольно большого числа гармоник, или гармонических составляющих. Каждый музыкальный инструмент создает звуки своего определенного тембра (или окраски), что обусловлено различием в числе обертонов или относительной величине их амплитуд. Иногда эти различия возникают не только из-за наличия многих резонансов в воздушном столбе или в струне, но также

и в результате резонансных колебаний корпуса инструмента. Дерево не легко приходит в состояние интенсивных колебаний, так как энергия колебаний быстро растрачивается в результате внутреннего затухания. Поэтому делать колокола из дерева бессмысленно, а звук деревянных духовых инструментов не особенно сильно окрашен, так как корпус инструмента не вносит сколько-нибудь заметного вклада, и кроме того, шероховатость внутренней поверхности деревянного инструмента значительно бóльшая, чем, например, у медных труб, способствует затуханию высоких обертонов, придающих звуку яркость и даже резкость.

Свойства меди как бы обратны свойствам дерева, поэтому для отливки колоколов обычно применяют бронзу. В медных духовых инструментах твердая, гладкая внутренняя поверхность сохраняет в результирующем звуке большую часть гармоник. Сурднна, надеваемая на медную трубу, приглушает ряд гармоник и смягчает тембр. Применяют сурдину и для скрипки, укрепляя зажим на подставке, что вводит трение в колебательное движение струн и сообщает тону мягкость и серебристость. Подробнее о затухании и поглощении звука мы будем говорить в следующих главах.

Благодаря наличию лишнего измерения набор гармоник у медных тарелок значительно сложнее, чем у струн или труб. В тарелке гораздо богаче возможности взаимного расположения узлов и пучностей; геометрия тарелок приводит к возникновению множества резонансов с близкими частотами, благодаря чему тарелки обладают очень красочным, но отнюдь не мелодичным звучанием.

Теперь уже совершенно ясно происхождение высоких по тону писков и визгов, которые издают некоторые инструменты, когда в них слишком сильно дуют или слишком быстро водят смычком по их струнам. Частота исходных возмущений становится слишком высокой для возбуждения основной частоты резонатора, и вместо нее возбуждается одна из гармоник. Однако это же явление можно применить с пользой: на нем основано действие инструментов семейства горнов. Играя на горне, музыкант может вызвать звук



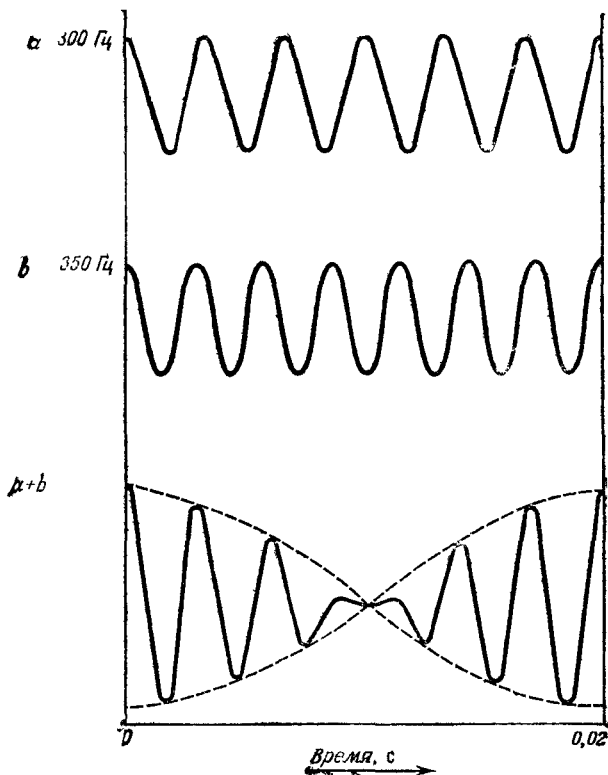
Р и с. 10. Музыкальная нотация гармоник (натуральная темпeрация).

Частоты гармоник равны основной частоте, умноженной на 2, 3, 4 и т. д.

основной частоты (иногда называемой первой гармоникой) или, напрягая губы, колебание которых заменяет образование вихрей в блок-флейте, может заставить звучать вторую, третью или множество других гармоник; так как по высоте звука низкие гармоники разделены большими интервалами (рис. 10), на таком инструменте, как горн, трудно сыграть что-нибудь более сложное, чем песенка «Бери ложку, бери хлеб», содержащую преимущественно интервалы в квинту и кварту. Играя на трубе, это затруднение можно обойти, потому что труба практически состоит как бы сразу из трех горнов с общими мундштуком и раструбом, но с корпусами различной длины, которые можно открывать и закрывать, пользуясь клапанами. Благодаря этому на трубе можно получить значительно большее число гармоник.

В отношении нумерации гармоник существует известная путаница: музыканты в отличие от акустиков иногда называют вторую гармонику первой, третью — второй и т. д., но в этой книге первая гармоника — это всегда основная частота, и счет гармоник начинается с нее.

До сих пор речь шла только о приятных звуках, а также о различных инструментах, производящих их, но на свете не так много мелодичных или гармоничных звуков. Почему? Что такое гармония и что такое диссонанс? Что делает музыку приятной, а шум — неприятным? Мы видели, что у музыкального звука большая часть энергии приходится на основную частоту и меньшая часть — на остальные гармо-



Р и с. 11. Наложение звуков.

ники. Когда две одинаковые ноты звучат одновременно, то колебания могут не совпадать по фазе, но сочетание звуков остается совершенно регулярным, потому что оба звука вызывают колебания давления, следующие друг за другом точно с одинаковой частотой. Если же частота одной из нот увеличится, допустим с 300 Гц до 350 Гц, новое сочетание будет составлять две ноты, из которых одна соответствует 300, а вторая — 350 колебаниям в секунду. Колебания будут происходить так, как показано на рис. 11, и в нашем случае два звука будут усиливать друг друга только 50 раз в секунду, то есть с частотой 50 Гц, численно равной разности между

частотами этих нот. Несмотря на то что этот так называемый разностный тон может и не восприниматься сознательно, все же образуется некоторая третья нота частотой 50 Гц. Именно присутствие этого третьего пульсирующего звука и придает комбинации данных нот диссонансное звучание¹. И действительно, когда сюда же присоединяются еще и гармоники обеих нот и их разностные тоны — толкотня получается изрядная!

Посмотрим, что произойдет, если частота второй ноты вдвое больше частоты первой ноты, иначе говоря, интервал между ними составляет одну октаву. Теперь частоты наших нот равны соответственно 300 и 600 Гц, и разностный тон также имеет частоту 300 Гц. Следовательно, его частота равна частоте первой ноты, и он сольется с ней так же хорошо, как соединяются ноты, равные по частоте. Вот почему октава представляет собой такой гармоничный интервал — самый гармоничный из возможных. Так же гармонично будут сливаться и гармоники с их разностными тонами. Следующий наиболее гармоничный интервал — квинта, в этом случае частота одной ноты на 50% выше, чем другой, и разностный тон оказывается точно на октаву ниже более низкой из нот.

Действительно резкое неблагозвучие возникает из набора множества разностных тонов в том случае, когда исчезает упорядоченная зависимость между отдельными нотами и остаются только пульсирующие звуки «кошачьего концерта». Если, например, нажать две самые нижние педали 16-футового регистра органа, получится превосходная имитация шума судового дизельного двигателя. Диссонанс, по существу, проблема количественная, он определяется интенсивностью биений, образующих разностные тоны. Специалистам по электронике, знакомым с принципом гетеродинирования сигналов в радиосвязи, сущность этой проблемы должна быть понятна.

¹ Здесь автор допускает неточность: в данном случае никакого разностного тона не получается, а разностная частота 50 Гц есть частота следования биений (пульсаций интенсивности звука), образующихся при совместном действии двух близких тонов — *Прим. ред.*

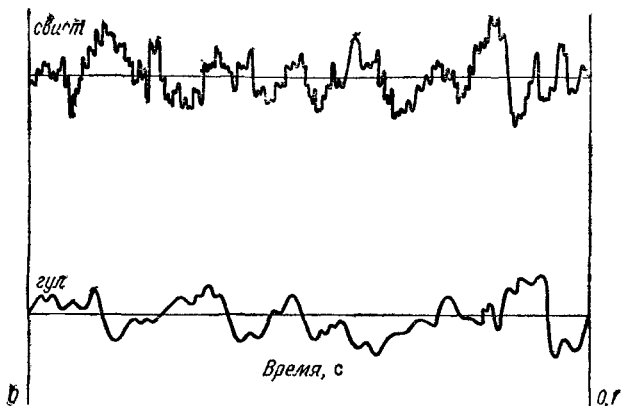


Рис. 12. Формы волн для свиста и гула.

Мы не коснулись еще одного очень распространенного типа звуков, который также представляет значительный интерес. Все музыкальные инструменты и даже дизельный двигатель производят звуки с периодически повторяющейся формой волны. Но нерегулярные, случайные и совсем не повторяющиеся звуковые волны встречаются столь же часто, как и периодические. Прислушаемся к ветру, к шелесту листьев, к шуму прибрежных волн, разбивающихся о берег, наконец, к реву форсунки парового котла, работающего на жидком топливе. В этих звуках нет ни нот, ни гармоник, ни гармонии, ни диссонанса.

Появляются такие звуки в результате турбулентности того или другого рода, а турбулентность — это просто беспорядочное движение, кружение и завихрение среды. При этом возникают колебания давления, которые вызывают в воздухе волны сжатия так же, как и любой источник звука, но без правильного повторения или ритмического движения. Случайный шум может возникать и как следствие других явлений, например в результате трения о неровную поверхность.

Как бы то ни было, но из нерегулярности шума отнюдь не следует, что к нему не применимо понятие частоты. Очевидно, шипение — звук более высокого тона, чем грохот, хотя оба они носят случайный

характер. Основана эта разница на том, что колебания давления при шипении происходят гораздо чаще, чем при грохоте. Это хорошо видно из рис. 12. Но и шипение, и грохот по своему звучанию совершенно отличны от периодических или гармонических звуков, и это обусловлено тем, что ухо не получает возбуждения в той упорядоченной форме, которая создает ощущение отдельных нот. Из-за отсутствия определенных гармоник различные звуки шипения лишены своеобразия и очень сходны между собой.

Когда мы имеем дело с шумом механизмов, основу звука, который мы слышим, составляет именно беспорядочный шум. К нему часто присоединяются чистые тоны и их гармоники, нередко в диссонансных сочетаниях, и в результате образуется звуковая волна очень сложной формы, содержащая периодические компоненты, наложенные на беспорядочный фон.

Шум в децибелах

В наше время все уже что-то слышали о «децибелах», но почти никто не знает, что это такое. Децибел представляется чем-то вроде акустического эквивалента «свечи» — единицы силы света — и кажется связанным со звоном колокольчиков¹. Однако это совсем не так: свое название децибел получил в честь Александра Грейама Белла — изобретателя телефона.

Децибел не только не единица измерения звука, он вообще не является единицей измерения, во всяком случае в том смысле, как, например, вольты, метры, граммы и т. д. Если угодно, в децибелах можно измерить даже длину волос, чего никак нельзя сделать в вольтах. По-видимому, все это звучит несколько странно, так что попытаемся дать разъяснение. Вероятно, никто не удивится, если я скажу, что расстояние от Лондона до Инвернесса в двадцать раз больше, чем от моего дома до Лондона. Я могу выразить любое расстояние, сравнивая его с расстоянием от моего дома до Лондона, скажем до площади Пикадилли. Расстояние от Лондона до Джон-о'Гротса в двадцать шесть раз больше, чем это последнее расстояние, а до Австралии — в 500 раз. Но это не означает, что Австралия удалена от чего бы то ни было на 500 единиц. Все приведенные числа выражают только отношения величин.

Одна из измеримых характеристик звука — это количество заключенной в нем энергии; интенсивность звука в любой точке можно измерить как поток энергии, приходящейся на единичную площадку, и выразить, например, в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

¹ Bell (бел) — по-английски значит колокол — *Прим. ред.*

При попытке записать в этих единицах интенсивность обычных шумов сразу же возникают трудности, так как интенсивность наиболее тихого звука, доступного восприятию человека с самым острым слухом, равна приблизительно $0,000\ 000\ 000\ 001$ Вт/м². Один из наиболее громких звуков, с которым мы сталкиваемся уже не без риска вредных последствий, — это шум реактивного самолета, пролетающего на расстоянии порядка 50 м. Его интенсивность составляет около 10 Вт/м². А на расстоянии 100 м от места запуска ракеты «Сатурн» интенсивность звука заметно превышает 1000 Вт/м². Очевидно, что оперировать числами, выражающими интенсивности звука, лежащие в столь широком диапазоне, очень трудно, независимо от того, представляем ли мы их в единицах энергии или даже в виде отношений. Существует простой, хотя и не вполне очевидный выход из данного затруднения. Интенсивность самого слабого слышимого звука равна $0,000\ 000\ 000\ 001$ Вт/м². Математики предпочтут записать это число таким образом: 10^{-12} Вт/м². Если кому-либо такая запись непривычна, напомним, что 10^2 это 10 в квадрате, или 100, а 10^3 это 10 в кубе, или 1000. Аналогично 10^{-2} означает $1/10^2$, или $1/100$, или 0,01, а 10^{-3} это $1/10^3$, или 0,001. Умножить любое число на 10^x — значит x раз умножить его на 10.

Пытаясь найти наиболее удобный способ выражения интенсивностей звука, попробуем представить их в виде отношений, приняв за эталонную интенсивность величину 10^{-12} Вт/м². При этом будем отмечать, сколько раз нужно умножить эталонную интенсивность на 10 для того, чтобы получить заданную интенсивность звука. Например, шум реактивного самолета в $10\ 000\ 000\ 000\ 000$ (или в 10^{13}) раз превышает наш эталон, то есть этот эталон необходимо 13 раз умножить на 10. Такой способ выражения позволяет значительно уменьшить значения чисел, выражающих гигантский диапазон звуковых интенсивностей; если мы обозначим однократное увеличение в 10 раз как 1 бел, то получим «единицу» для выражения отношений. Так, уровень шума реактивного самолета соответствует 13 белам. Бел оказывается слишком большой величиной; удобнее пользоваться более мелкими единицами, десятыми долями бела,

которые и называют децибелами. Таким образом, интенсивность шума реактивного двигателя равна 130 децибелам (130 дБ), но во избежание путаницы с каким-либо другим эталоном интенсивности звука следует указать, что 130 дБ определяется относительно эталонного уровня 10^{-12} Вт/м².

Если отношение интенсивности данного звука к эталонной интенсивности выражается каким-нибудь менее круглым числом, например 8300, перевод в децибелы окажется не таким простым. Очевидно, число умножений на 10 будет больше 3 и меньше 4, но для точного определения этого числа необходимы длительные вычисления. Как обойти такое затруднение? Оказывается, весьма просто, поскольку все отношения, выраженные в единицах «десятикратных увеличений», давно вычислены — это логарифмы.

Любое число можно представить как 10 в какой-то степени: 100 это 10^2 и, следовательно, 2 — это логарифм 100 при основании 10; 3 — логарифм 1000 при основании 10 и, что менее очевидно, 3,9191 — логарифм 8300. (Нет необходимости все время повторять «при основании 10», потому что 10 — самое распространенное основание логарифма, и если нет другого указания, то подразумевается именно это основание. В формулах эта величина записывается как \log_{10} или \lg .)

Пользуясь определением децибела, можем теперь записать уровень интенсивности звука в виде:

$$\begin{aligned} \text{Уровень интенсивности} &= \\ &= 10 \lg \frac{\text{измеренная интенсивность}}{\text{эталонная интенсивность}} \text{ (дБ)}. \end{aligned}$$

Например, при интенсивности звука в $0,26$ ($2,6 \times 10^{-1}$) Вт/м² уровень интенсивности в дБ относительно эталона 10^{-12} Вт/м² равен

$$10 \lg \frac{2,6 \cdot 10^{-1}}{10^{-12}} = 10 \lg (2,6 \cdot 10^{11}) \text{ дБ}.$$

Но логарифм 2,6 равен 0,415; следовательно, окончательный ответ выглядит так:

$$10 \times 11,415 = 114 \text{ дБ}$$

(с точностью до 1 дБ).

Не следует забывать, что децибелы не являются единицами измерения в том смысле слова, как, например, вольты или омы, и что соответственно с ними приходится обращаться иначе. Если две аккумуляторные батареи по 6 В (вольт) соединить последовательно, то разность потенциалов на концах цепи составит 12 В. А что получится, если к шуму в 80 дБ добавить еще шум в 80 дБ? Шум общей интенсивностью в 160 дБ? Никак нет — ведь при удвоении числа его логарифм возрастает на 0,3 (с точностью до двух десятичных знаков). Тогда при удвоении интенсивности звука уровень интенсивности увеличивается на 0,3 бела, то есть на 3 дБ. Это справедливо для любого уровня интенсивности: *удвоение интенсивности звука приводит к увеличению уровня интенсивности на 3 дБ*. В табл. 1 показано, как увеличивается уровень интенсивности, выраженный в децибелах, при сложении звуков различной интенсивности.

Теперь, разрешив тайну децибела, приведем несколько примеров. В табл. 2 даны перечень типичных шумов и уровни их интенсивности в децибелах.

Каким образом можно определить интенсивность данного звука? Это довольно сложная задача; значительно легче измерить колебания давления в звуковых волнах. В табл. 3 приведены значения звукового давления для звуков различной интенсивности. Из этой

Таблица 1

Сложение уровней интенсивности звука (точность $\pm 0,5$ дБ)

Разность между двумя уровнями, дБ	Прибавка к более высокому уровню
0	3
1	2,5
2	2
3	2
4	1,5
5	1
6	1
7	1
8	0,5
9	0,5
10	0

Интенсивность типичных шумов

Примерный уровень звукового давления, дБА	Источник звука и расстояние до него
160	Выстрел из ружья калибра 0,303 вблизи уха
150	Взлет лунной ракеты, 100 м
140	Взлет реактивного самолета, 25 м
120	Машинное отделение подводной лодки
100	Очень шумный завод
90	Тяжелый дизельный грузовик, 7 м
80	Дорожный перфоратор (незаглушенный), 7 м
75	Звон будильника, 1 м
70	В железнодорожном вагоне
65	В салоне небольшого автомобиля, движущегося со скоростью 50 км/ч; квартирный пылесос, 3 м
65	Машинное бюро
40	Обычный разговор, 1 м
40	Учреждение, где нет специальных источников шума
35	Комната в тихой квартире
25	Сельская местность, расположенная вдали от дорог

таблицы видно, что диапазон звуковых давлений не так широк, как диапазон интенсивностей: давление возрастает вдвое медленнее, чем интенсивность. При удвоении звукового давления энергия звуковой волны должна увеличиться в четыре раза — тогда соответственно увеличится скорость частиц среды. Поэтому, если мы измерим звуковое давление, как и интенсивность, в логарифмическом масштабе и, кроме того, введем множитель 2, получим те же величины для уровня интенсивности. Например, звуковое давление самого слабого из слышимых звуков равно примерно $0,000\ 02\ \text{Н (ньютон)/м}^2$, а в кабине дизельного грузовика оно составляет $2\ \text{Н/м}^2$, следовательно, уровень интенсивности шумов в кабине равен

$$20 \lg \frac{2 \times 10^0}{2 \times 10^{-5}} = 20 \lg 10^5 = 100\ \text{дБ.}$$

Выражая уровень звукового давления в децибелах, следует помнить, что при увеличении давления

**Интенсивность, звуковое давление и уровень звука
в воздухе при комнатной температуре и нормальном
давлении на уровне моря**

Интенсивность, Вт/м ²	Звуковое давление, Н/м ²	Уровень звука, дБ
100 000 000	200 000	200
10 000 000		190
1 000 000	20 000	180
100 000		170
10 000	2 000	160
1 000		150
100	200	140
10		130
1	20	120
0,1		110
0,01	2	100
0,001		90
0,0001	0,2	80
0,00001		70
0,000001	0,02	60
0,0000001		50
0,00000001	0,002	40
0,000000001		30
0,0000000001	0,0002	20
0,000000000001		10
0,0000000000001	0,00002	0

вдвое прибавляется 6 дБ. Если в кабине дизельного грузовика шум достигнет 106 дБ, то звуковое давление удвоится и составит 4 Н/м², а интенсивность увеличится в четыре раза и достигнет 0,04 Вт/м².

Мы много говорили о мере интенсивности звука, но совершенно не касались практических методов измерения этой величины. К доступным для измерения характеристикам звуковой волны относятся интенсивность, давление, скорость и смещение частиц. Все эти характеристики непосредственно связаны друг с другом, и, если удастся измерить хотя бы одну из них, остальные можно вычислить.

Нетрудно увидеть или почувствовать на ощупь колебание легких предметов, оказавшихся на пути звуковой волны. На этом явлении основан принцип действия осциллографа — самого старого вида шумомера. Осциллограф состоит из диафрагмы, к центру

которой прикреплена тонкая нить, механической системы для усиления колебаний, и пера, записывающего на бумажной ленте смещения диафрагмы. Такие записи напоминают «волнистые линии», о которых мы говорили в предыдущей главе.

Этот прибор был крайне малочувствителен и годился только для подтверждения акустических теорий ученых того времени. Инерция механических деталей предельно ограничивала частотную характеристику и точность прибора. Замена механического усилителя оптической системой и использование фотографического метода регистрации сигналов позволили значительно снизить инерционность прибора. В усовершенствованном таким образом устройстве нить диафрагмы наматывалась на вращающийся барабан, закрепленный на оси, к которой прикреплялось зеркальце, вращающееся вместе с барабаном. На зеркальце падал луч света; при поворотах зеркальца то в одну, то в другую сторону, происходивших в результате колебаний мембраны, луч отклонялся, и эти отклонения можно было записывать на светочувствительную бумагу. И только с развитием электроники были разработаны более или менее точные измерительные приборы, а для конструирования современного портативного шумомера пришлось дожидаться изобретения транзисторов.

По существу, современный шумомер — это электронный аналог старого механического устройства. Первым шагом в процессе измерения служит преобразование звукового давления в изменения электрического напряжения; это преобразование производит микрофон. В настоящее время в таких приборах применяют микрофоны самых различных типов: конденсаторные, с движущейся катушкой, кристаллические, ленточные, с нагретой проволокой, с сегнетовой солью — это лишь малая часть всех типов микрофонов. В нашей книге мы не будем рассматривать принципы их действия.

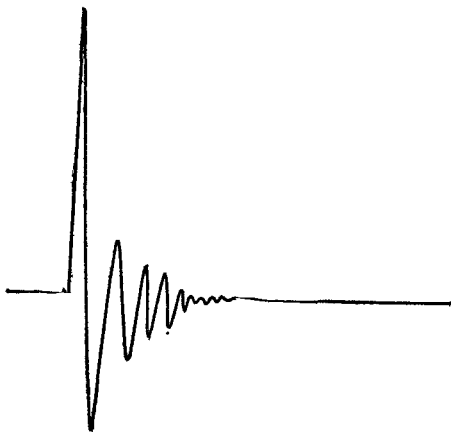
Все микрофоны выполняют одну и ту же основную функцию, и большинство из них снабжено мембраной того или иного вида, которая приводится в колебания изменениями давления в звуковой волне. Смещения мембраны вызывают соответствующие изменения

напряжения на зажимах микрофона. Следующий шаг в измерении — усиление, а затем выпрямление переменного тока и заключительная операция — подача сигнала на вольтметр, откалиброванный в децибелах. В большинстве таких приборов вольтметром измеряются не максимальные, а «среднеквадратичные значения» сигнала, то есть результат определенного вида усреднения, которым пользуются чаще, чем максимальными значениями.

Обычным вольтметром нельзя охватить огромный диапазон звуковых давлений и поэтому в той части устройства, где происходит усиление сигнала, имеется несколько цепей, различающихся по усилению на 10 дБ, которые можно включать последовательно одну за другой.

Однако до сих пор еще широко применяют усовершенствованную модель старого осциллографа. В электронно-лучевом осциллокопе проблема инерционности, свойственная механическому осциллографу, полностью исключена, так как масса электронного луча пренебрежимо мала и он легко отклоняется электромагнитным полем и рисует на экране кривую колебаний напряжения, подаваемого на прибор.

Полученная осциллографическая запись применяется для математического анализа формы звуковой волны. Осциллокопы также чрезвычайно полезны и при измерении импульсных шумов. Как мы уже говорили, обычный шумомер непрерывно определяет среднеквадратичные значения сигнала. Но, например, звуковой хлопок или орудийный выстрел не порождают непрерывный шум, а создают единичный, очень мощный, иногда опасный для слуха импульс давления, который сопровождается постепенно затухающими колебаниями давления (рис. 13). Начальный скачок давления может повредить слух или разбить оконное стекло, но так как он единичен и кратковременен, то среднеквадратичная величина не будет для него характерна и может только привести к недоразумению. Хотя для измерения импульсных звуков существуют специальные шумомеры, большая часть их не сможет зарегистрировать полностью среднеквадратичную величину импульса просто потому, что они не успевают сработать. Вот здесь осциллокоп и демонстрирует



Р и с. 13. Типичный импульсный шум.

свои преимущества, мгновенно вычерчивая точную кривую подъема давления, так что максимальное давление в импульсе можно измерить прямо на экране.

Возможно, одним из наиболее существенных вопросов акустики является зависимость поведения звука от его частоты. Нижняя частотная граница восприятия звука человеком составляет около 30 Гц, а верхняя — не выше 18 кГц; поэтому шумомер должен был бы регистрировать звуки в том же диапазоне частот. Но тут возникает серьезное затруднение. Как мы увидим в следующей главе, чувствительность человеческого уха для различных частот далеко не одинакова; так, например, чтобы звуки с частотой 30 Гц и 1 кГц звучали одинаково громко, уровень звукового давления первого из них должен быть на 40 дБ выше, чем второго. И следовательно, показания шумомера сами по себе еще не многого стоят.

Этой проблемой занялись специалисты по электронике, и современные шумомеры снабжены корректирующими контурами, состоящими из отдельных цепочек, подключая которые можно снизить чувствительность шумомера к низкочастотным и очень высокочастотным звукам и тем самым приблизить частотные характеристики прибора к свойствам человеческого уха. Обычно шумомер содержит три

корректирующих контура, обозначаемых А, В и С; наиболее полезна коррекция А; коррекцию В применяют лишь изредка; коррекция С мало влияет на чувствительность в диапазоне 31,5 Гц — 8 кГц. В некоторых типах шумомеров используется еще коррекция D, которая позволяет считывать показания прибора прямо в единицах PN дБ, применяемых для измерения шума самолетов (см. Акуст. словарь). Точный расчет PN дБ весьма сложен, но для высоких уровней шума уровень в единицах PN дБ равен уровню в дБ, измеренному шумомером с коррекцией D, плюс 7 дБ; в большинстве случаев шум реактивных самолетов, выраженный в PN дБ, приблизительно равен уровню в дБ, измеренному шумомером с коррекцией А, плюс 13 дБ.

В настоящее время почти повсеместно уровень шума принимают равным уровню, измеренному в дБ при помощи шумомера с коррекцией А, и выражают его в единицах дБА. Хотя человеческое ухо воспринимает звук несравненно более утонченно, чем шумомер, и поэтому звуковые уровни, выраженные в дБА, ни в коей мере не соответствуют точно физиологической реакции, но простота этой единицы делает ее чрезвычайно удобной для практического применения.

Важнейший недостаток измерения громкости в дБА состоит в том, что при этом наша реакция на звуки низкой частоты недооценивается и совершенно не учитывается повышенная чувствительность уха к громкости чистых тонов.

К числу достоинств шкалы дБА следует, в частности, отнести то обстоятельство, что здесь, как мы увидим в следующей главе, удвоение громкости грубо соответствует увеличению уровня шума на 10 дБА. Однако даже эта шкала дает не более чем грубое указание на роль частотного состава шума, а так как эта характеристика шума часто чрезвычайно важна, то результаты измерений, проведенных с помощью шумомера, приходится дополнять данными, полученными при использовании других приборов.

Частоты, как и интенсивности, измеряют в логарифмическом масштабе, причем за основу принимают ступени удвоения числа колебаний в секунду. Так как, однако, диапазон частот менее широк, чем диапазон

интенсивностей, число десятикратных увеличений не подсчитывают, десятичными логарифмами не пользуются и частоты звука всегда выражают числом колебаний, или циклов в секунду. За единицу частоты принимают одно колебание в секунду, или 1 герц (Гц). Определение интенсивности звука для каждой частоты потребовало бы бесконечного числа измерений. Поэтому, как и в музыкальной практике, весь диапазон разделяют на октавы. Самая большая частота в каждой октаве в два раза превышает самую малую. Первый, наиболее простой этап частотного анализа звука — измерение уровня звукового давления в пределах каждой из 8 или 11 октав, в зависимости от интересующего нас диапазона частот; при измерении сигнал с выхода шумомера поступает на набор октавных фильтров, или на октавный полосовой анализатор. Слово «полоса» указывает на тот или иной участок частотного спектра. Анализатор содержит 8 или 11 электронных фильтров. Эти устройства пропускают только те частотные компоненты сигнала, которые лежат в пределах их полосы. Включая фильтры по одному, можно последовательно измерить уровень звукового давления в каждой полосе непосредственно при помощи шумомера.

Но во многих случаях даже октавные анализаторы не дают достаточных сведений о сигнале, и тогда прибегают к более детальному анализу, применяя фильтры в половину или в одну треть октавы. Для получения еще более детального анализа используют узкополосные анализаторы, которые «разрезают» шум на полосы постоянной относительной ширины, например 6% от средней частоты полосы или на полосы шириной в определенное число герц, например 10 или 6 Гц. Если в шумовом спектре присутствуют чистые тоны, что случается нередко, их частоту и амплитуду можно установить точно с помощью анализатора дискретных частот.

Обычно звукоанализирующая аппаратура очень громоздка, и поэтому ее применение ограничивается рамками лабораторий. Весьма часто звук, подлежащий исследованию, через микрофон и усилительные цепи шумомера записывают на высококачественный портативный магнитофон, применяя для калибровки

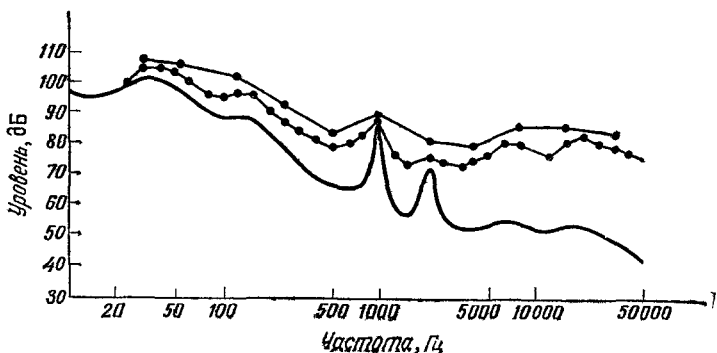


Рис. 14. Анализ звука с помощью октавного и третьоктавного фильтров и фильтра с шириной полосы 6 Гц.

контрольные сигналы; затем запись проигрывают уже в лаборатории, подавая сигнал на анализатор, который автоматически вычерчивает частотный спектр на бумажной ленте. На рис. 14 изображены спектры типичного шума, полученные с помощью октавного, третьоктавного и узкополосного (полоса 6 Гц) анализаторов.

Однако, чтобы измерить шум, еще недостаточно знать уровень громкости и частоту звука. Если говорить о шуме окружающей среды, то он складывается из множества отдельных шумов различного происхождения: это шумы уличного движения, самолетов, промышленные шумы, а также шумы, возникающие в результате других видов деятельности человека. Если попытаться измерить уровень шума на улице обычным шумомером, то окажется, что это чрезвычайно сложная задача: стрелка шумомера будет непрерывно колебаться в очень широких пределах. Что же следует принять за уровень шума? Максимальный отсчет? Нет, эта цифра слишком высока и непоказательна. Средний уровень? Это было бы возможно, но крайне трудно оценить среднюю величину для какого-то определенного промежутка времени, а чтобы удерживать стрелку в пределах шкалы, придется непрерывно менять ступени усиления шумомера.

Существуют два общепринятых метода учета флуктуаций уровня шума, позволяющие выразить

Статистическое распределение уровней шума при сильно флуктуирующем шумовом климате, показывающее время (в %), в течение которого был превышен каждый из уровней, указанных в первом столбце. (На основании этой таблицы путем интерполяции получены следующие значения: $L_1 = 94$ дБА, $L_{10} = 83$ дБА, $L_{50} = 72$ дБА, $L_{90} = 66$ дБА и $L_{99} = 60$ дБА, с точностью до 1 дБ.)

Уровень шума, дБА	Время, в течение которого был превышен данный уровень, %
100	0
95	0,7
90	2,9
85	8,3
80	15,0
75	33,6
70	62,5
65	96,7
60	98,9
55	100

этот уровень в численной мере. В первом методе используют так называемый анализатор статистического распределения. Это устройство регистрирует относительную долю времени, в течение которого измеряемый уровень шума находится в пределах каждой из ступеней шкалы, расположенных, например, через каждые 5 дБ. Результаты таких измерений показывают, в течение какой доли полного времени был превышен каждый из звуковых уровней. Нанеся на график числа, представленные в табл. 4, соединив точки плавной линией и установив уровни, которые были превышены в течение 1, 10, 50, 90 и 99% времени, мы сможем дать удовлетворительное описание «шумового климата». Указанные уровни обозначаются так: L_1 , L_{10} , L_{50} , L_{90} и L_{99} . L_1 дает представление о максимальном значении уровня шума, L_{10} — это характерный высокий уровень, тогда как L_{90} как бы показывает шумовой фон, то есть уровень, до которого снижается шум при наступлении временного затишья. Большой интерес представляет разность между значениями L_{10} и L_{90} ; она указывает, в каких пределах в каждом

данном месте варьируется уровень шума, а чем больше колебания шума, тем сильнее его раздражающее воздействие. Впрочем, уровень L_{10} и сам по себе служит хорошим показателем беспокоящего действия транспортного шума; этот показатель широко применяется при измерении и прогнозировании транспортного шума, и с его учетом определяют размеры государственной компенсации жертвам шума новых автострад и дорог (см. гл. 11). Итак, L_{10} — это уровень звука, выраженный в дБА, который превышает в течение точно десяти процентов от полного времени измерений.

Обычно транспортный шум флуктуирует вполне определенным образом, поэтому уровень L_{10} служит самостоятельным достаточно удовлетворительным показателем шума, хотя только частично представляет статистическую картину шума. Если же шумы меняются беспорядочно, как, например, это происходит при наложении друг на друга железнодорожных, промышленных и иногда самолетных шумов, распределение шумовых уровней сильно колеблется от точки к точке. В подобных случаях также желательно выразить все статистические данные одним числом. Были сделаны попытки изобрести формулу, включающую всю картину шума, включая и размах шумовых флуктуаций. К таким показателям относятся «индекс транспортного шума» и «уровень шумового загрязнения», но самый распространенный показатель — это особого рода средняя величина, обозначаемая $L_{ЭКВ}$. Она характеризует среднее значение энергии звука (в отличие от арифметического усреднения уровней, выраженных в дБ); иногда $L_{ЭКВ}$ называют эквивалентным уровнем непрерывного шума, потому что численно эта величина соответствует уровню такого строго стабильного шума, при котором за весь период измерения микрофон принял бы то же суммарное количество энергии, какое поступает в него при всех неравномерностях, всплесках и выбросах измеряемого флуктуирующего шума. В простейшем случае $L_{ЭКВ}$ составит, например 90 дБА, если уровень шума все время равнялся 90 дБА, или если половину времени измерения шум составлял 93 дБА, а остальное время полностью отсутствовал. Действительно, так как

удвоение интенсивности или энергии шума приводит к увеличению его уровня на 3 дБ, то для того, чтобы при удвоении интенсивности шума сохранить постоянным общее количество энергии, следует вдвое уменьшить время его действия. Аналогично ту же величину $L_{\text{ЭКВ}} = 90$ дБА мы получим при уровне шума 100 дБА, если он действует в течение одной десятой того же промежутка времени. Измерение расхода электроэнергии при помощи электросчетчика производится подобным же образом. На практике периоды постоянного уровня шума и периоды полного его отсутствия встречаются не часто, и поэтому рассчитать $L_{\text{ЭКВ}}$ достаточно сложно. Здесь на помощь приходят таблицы распределения типа табл. 4, или специально сконструированные автоматические счетчики. Индекс $L_{\text{ЭКВ}}$ обладает двумя недостатками: при усреднении короткие всплески шума с высоким уровнем вносят больший вклад, чем периоды шума низкого уровня; кроме того, увеличение числа максимумов мало влияет на величину $L_{\text{ЭКВ}}$. Например, если при усреднении за день шума от 100 поездов получается эквивалентный уровень $L_{\text{ЭКВ}} = 65$ дБА, то при увеличении числа поездов вдвое $L_{\text{ЭКВ}}$ возрастает всего на 3 дБА. Для того чтобы величина $L_{\text{ЭКВ}}$ возросла так же, как при удвоении громкости (то есть как при увеличении уровня на 10 дБА) шума, создаваемого каждым из поездов, их число пришлось бы увеличить в 10 раз. И все же, несмотря на некоторую неполноценность, шкала $L_{\text{ЭКВ}}$ представляет собой наилучшую универсальную меру шума из всех имеющихся в настоящее время. В Англии она постепенно получит такое же распространение, какое имеет на континенте. Сейчас она уже применяется в Англии для измерения дозы шума, получаемой лицами, работающими в промышленности по найму.

Применяется и другая мера, по существу гораздо более сходная с $L_{\text{ЭКВ}}$, чем может показаться на первый взгляд: это нормировочный индекс шума, к сожалению слишком хорошо знакомый тем, кто живет вблизи крупных аэропортов. Шкалу нормировочных индексов шума используют для характеристики среднемаксимальных уровней шума самолетов, выраженных в PN дБ (так называемый «воспринимаемый

уровень звука», см. Акуст. словарь), а так как она начинается от уровня $80 PN$ дБ (около 67 дБА), то значение 80 вычитается из величины среднемаксимального уровня. Теоретически, если за время измерения шум производит только один самолет, величина этого индекса будет точно равняться среднемаксимальному уровню в PN дБ минус 80. При каждом удвоении числа самолетов следует прибавлять к этому числу 4,5 единицы, а не 3, как для шкалы $L_{экв}$. Хотя формула этого индекса и выглядит несколько ошеломляюще, выше нам удалось фактически полностью его охарактеризовать. Если отдельные пиковые уровни шума самолетов различаются всего на несколько дБ, усредненную величину можно вычислить арифметически. В противном случае значения уровня шума, выраженные в дБ, придется обратно переводить в величины интенсивности, и здесь потребуются таблица логарифмов и светлая голова!

Существует множество других мер, шкал и индексов для измерения шума, включая фоны, соны, нои, различные производные PN дБ и ряд других критериев, не считая всех международных вариантов шкалы нормировочных индексов шума. В главе 11 мы рассмотрим индекс, называемый «исправленный уровень шума», официально принятый в Англии для измерения промышленного шума. Заниматься описанием других единиц и показателей нет необходимости; следует отметить, что в США для измерения шума на рабочем месте принят показатель $L_{экв}$, но при удвоении времени воздействия шума к его значению там прибавляют не 3 дБ, как в Европе, а 5 дБ. В остальном показатели дБА, L_{10} и $L_{экв}$ применяются одинаково во всем мире.

Слух и повреждения слуха

Представьте себе устройство, с помощью которого с одинаковой точностью можно взвесить и блоху, и слона! Это кажется невозможным, но ведь человеческое ухо выполняет не менее трудную задачу: самый громкий звук, воспринимаемый им, в 10 триллионов (10^{13}) раз сильнее самого тихого; ухо анализирует звуки, различающиеся по частоте почти в 1000 раз. Мы довольно бойко заговорили об ушах и слухе. Однако что же такое слух? Что происходит на концах этих трубочек? На первый взгляд все кажется совершенно ясным: уши — это орган восприятия звуков. Но устройство их столь тонко и сложно и действуют они сообща с такой точностью, достойной вычислительной машины, что до сих пор наука еще не до конца проникла в их тайну.

Что делают уши? Они воспринимают звук и разлагают его на компоненты, действуя одновременно и как узкополосные анализаторы, и как анализаторы дискретных частот. Они передают в мозг кодированную информацию, достаточно богатую подробностями, что позволяет интерпретировать или идентифицировать звуки и понимать сложную речь. Уши осуществляют также обратную связь, позволяя человеку управлять своей речью; с их помощью мы определяем направление и расстояние до источника звука; из громкого неупорядоченного шума уши могут выделить регулярные звуки, что делает возможным разбирать речь, заглушаемую шумом. В ушах находятся также и органы равновесия. Словом, несмотря на кажущуюся простоту, уши относятся к самым сложным органам человеческого тела, хотя мы и привыкли воспринимать их существование и действие как нечто обычное.

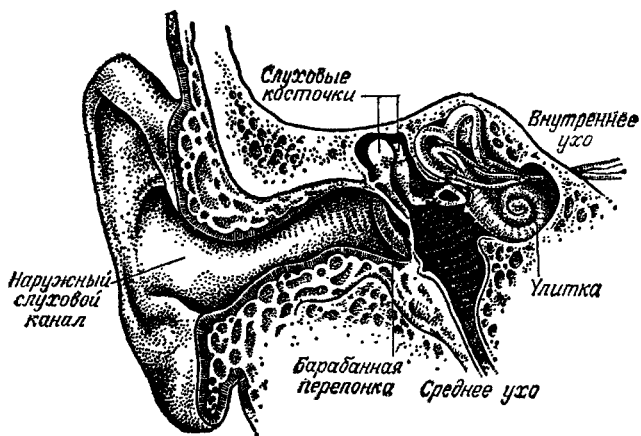


Рис. 15. Ухо.

В ухе различают три самостоятельные отдела: наружное, среднее и внутреннее ухо (рис. 15). Лучший способ разобраться в строении уха — это проследить путь, который проходит звуковая волна, прежде чем мы услышим звук. Из гл. 3 мы уже знаем, что, когда звуковая волна бежит по трубе и достигает ее открытого конца, внезапное столкновение волны с бесконечно большим объемом наружного воздуха вызывает почти полное ее отражение. И наоборот, когда звук бежит в воздухе и встречает на своем пути открытый конец трубы, он входит в трубу, обладая лишь малой долей интенсивности наружной волны.

Часть уха, которую в просторечии мы называем ушным отверстием, — в науке она именуется наружным слуховым проходом — представляет собою трубку. Сама по себе эта трубка не могла бы достаточно эффективно воспринимать звуки из внешнего мира ввиду, говоря техническим языком, несогласования импедансов слухового прохода и внешней среды; без близкого согласования импедансов здесь, как и в радиотехнике, невозможна достаточно полная передача энергии. Это затруднение преодолевается с помощью мясистой лепешки с хрящами, называемой ушной раковиной, которую по незнанию часто недооценивают, не признавая за ней акустической функции. Ушная

раковина благодаря особенностям своей формы делает более плавным переход от наружного воздуха к воздуху в слуховом проходе, что несколько увеличивает долю звуковой энергии наружной волны, попадающей в слуховой проход. Ушная раковина аналогична антенне в радиотехнических устройствах.

Проникнув в наружный слуховой проход, звук распространяется далее как плоская волна и через 2—3 см встречает на своем пути барабанную перепонку. Она представляет собой мембрану, которая удерживается в состоянии известного натяжения двумя мышцами, *tensor tympani* и *tensor stapedius*, и приводится в движение в результате колебания давления в наружном слуховом проходе. К барабанной перепонке присоединены три малые косточки: молоточек, наковальня и стремя, которые находятся в заполненной воздухом костной полости. Форма стремени оправдывает его название; своим основанием стремя упирается в овальное окно — отверстие, ведущее во внутреннее ухо. Среднее ухо с его тремя косточками — еще одно приспособление для согласования импедансов; его можно считать акустическим трансформатором. Три косточки, объединенные названием «слуховые косточки», образуют плечи рычага, длины которых относятся приблизительно как 3 : 1, и если учесть, что поверхность овального окна во много раз меньше поверхности барабанной перепонки, то оказывается, что давление, передаваемое на овальное окно, приблизительно в 20 раз больше, чем давление, испытываемое барабанной перепонкой.

Среднее ухо соединено с носоглоткой евстахиевой трубой, получившей свое название по имени открывшего ее итальянского анатома. При глотании евстахиева труба открывается и давление по обе стороны барабанной перепонки выравнивается, что существенно, в частности, для компенсации изменений давления, которые происходят, например, при подъеме на высоту. Вероятно, каждому, кто летал на самолетах, внутри которых давление не поддерживается достаточно постоянным, приходилось испытывать ослабление слуха или боль в ушах при посадке или на взлете; эти ощущения особенно сильны при насморке. Причина их — падение или увеличение атмосферного

давления снаружи барабанной перепонки, когда давление внутри среднего уха сохраняется неизменным. В этих условиях барабанная перепонка оказывается под действием одностороннего давления, что снижает ее способность к колебаниям и вызывает некоторую тугоухость. При достаточно сильном давлении на барабанную перепонку появляется боль в ушах.

Обычно при глотании все эти ощущения исчезают: евстахиева труба открывается, воздух проходит в полость среднего уха или выходит из нее, и давление по обе стороны барабанной перепонки уравнивается. Затем евстахиева труба вновь закрывается, и барабанная перепонка может возобновить колебания. Но при насморке евстахиева труба и даже полость среднего уха наполнены слизистыми выделениями, и выравнивание давления может не произойти. В среднем ухе часто содержится небольшое количество жидкости, которая выводится при глотании, но если полость заполнена слизью, то колебания слуховых косточек тормозятся вязкостью жидкости, и это еще более снижает чувствительность слуха.

Слуховой процесс завершается после того, как колебания косточек передаются во внутреннее ухо. Этот отдел представляет собой сложную систему трубочек, заключенных в кость черепа, и называется лабиринтом. В нем объединены два различных органа; одна его часть — это вестибулярный аппарат, включающий полукружные каналы и не имеющий отношения к слуховому процессу. Вестибулярный аппарат — это устройство для измерения углового ускорения тела, позволяющее удерживать равновесие. Другая часть лабиринта, улитка, — самый сложный элемент уха. С виду она похожа на очень маленькую раковину улитки и состоит из спиральной трубочки, заполненной жидкостью, называемой перилимфой; улитка делится перегородкой на две параллельные полости: верхний и нижний каналы. Эти каналы на конце улитки соединяются небольшим отверстием в перегородке, называемым геликотремой.

Если бы спиральную трубочку улитки удалось развернуть, она приобрела бы форму, изображенную на рис. 16, а. Движение стремени в овальном окне вызывает колебания перилимфы, возможные благодаря

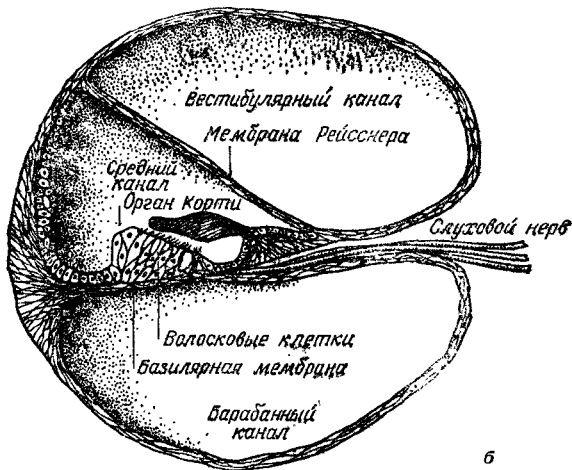
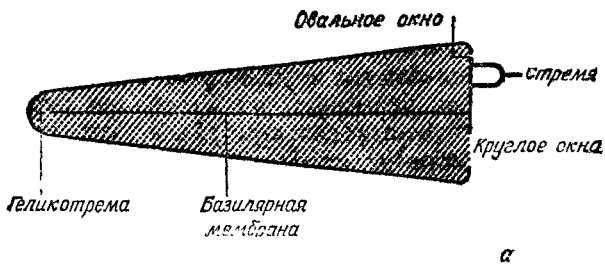


Рис. 16. Схема «развернутой» улитки (а). Сечение витка улитки (б).

тому, что круглое окно, расположенное в конце нижнего канала, затянуто гибкой мембраной, которая допускает перемещение практически несжимаемой жидкости.

Перегородка улитки состоит из мембраны Рейсснера и базилярной мембраны и содержит другую жидкость — эндолимфу. В пространстве между этими двумя мембранами находится орган Корти, содержащий приблизительно 24 000 так называемых волосковых клеток, расположенных на базилярной мембране, имеющей волокнистую структуру, напоминающую

струны арфы. Специалисты пока еще не пришли к единодушному мнению относительно того, как именно эти клетки, связанные с нервными окончаниями и слуховым нервом, реагируют на колебания перилимфы. Некоторые ученые считали ранее, что волокна базилярной мембраны находятся в состоянии натяжения и их резонансная частота (вспомним натянутую струну) прогрессивно понижается с удалением от основания мембраны овального окна, а частотный анализ звука осуществляется благодаря тому, что каждое волокно возбуждается только на своей собственной частоте.

Сейчас наибольшим признанием пользуется теория Георга фон Бекеша. Согласно этой теории, волокна не натянуты и сложные механические силы вызывают изгибание базилярной мембраны в разных точках (в зависимости от частоты звука) по ее длине; при этом орган Корти испытывает сдвиговые напряжения в соответствующих точках, что в свою очередь вызывает возбуждение нервных волокон.

Однако довольно физиологии. Поговорим лучше о том, что именно слышат уши, потому что для жертв шума это гораздо важнее, чем как именно они слышат. Самый низкий тон, воспринимаемый человеком с нормальным слухом, имеет частоту около 20 Гц. Точно установить нижнюю границу шкалы слышимости довольно трудно, поскольку звуки с частотой ниже 20 Гц нередко воспринимаются не органом слуха, а другими участками нервной системы. Верхний предел слухового восприятия сильно различается у разных людей. Особое значение здесь имеет возраст. В восемнадцать лет при безупречном слухе можно услышать звук до 20 000 Гц [20 кГц (килогерц)], но в среднем границы слышимости для любого возраста лежат в интервале 18—16 кГц. Некоторые люди почти постоянно ощущают в ушах слабый звон очень высокой частоты, что мешает им различать внешние раздражители подобной частоты.

Термины «высота звука» и «частота звука» отнюдь не равнозначны. Частота — это физическая величина, характеризующая звуковую волну, а высота тона — чисто субъективное ощущение, которое зависит не только от частоты. При больших интенсивно-

стях высота звука повышается как на высокой, так и на низкой частоте, при малой же интенсивности низкочастотного звука его частота может изменяться примерно на 5% без заметного для слушателя изменения высоты.

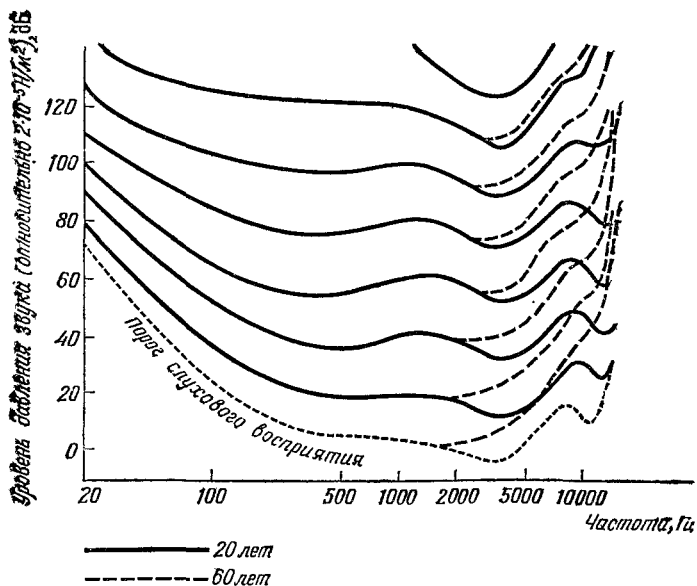
Высота тона и частота не являются синонимами еще и по той причине, что сложные звуки часто обладают определенной высотой, но в действительности состоят из целого ряда частот. Так, например, звук скрипки имеет определенную высоту, но содержит множество гармоник, имеющих различные частоты.

Высота, которую обычно приписывают такому звуку, — это высота основной частоты, или первой гармоники; однако, как оказывается, если из такого сложного звука убрать основную частоту, его высота останется для слушателя той же, изменится только окраска тона, или тембр. Это следует считать слуховой иллюзией: показано, что в подобных случаях отсутствует возбуждение в том участке улитки, который обычно возбуждается на основной частоте.

С возрастом чувствительность человеческого уха к высокочастотным звукам постепенно падает; это совершенно нормальный процесс, называемый пресбикузисом. На рис. 17 показано обычное течение этого процесса. Кривые, соответствующие самым низким слышимым уровням звука для различных частот, одновременно отражают одно из важнейших явлений акустики: слух гораздо чувствительнее к звукам в области 4 кГц, чем к более низким или более высоким звукам. Обычно звук частотой 30 Гц слышен только при уровне звукового давления 60 дБ, тогда как для молодого человека с хорошим слухом порог слышимости на частоте 4 кГц может опускаться, как известно, до —2 дБ. Знак «минус» не должен никого смущать: он вовсе не означает, что речь идет о количествах звука, «меньших, чем отсутствие звука». Вспомним, что уровень звукового давления обычно выражают в децибелах относительно уровня $0,00002 \text{ Н/м}^2$. Если измеряемое звуковое давление меньше этой величины, уровень в дБ выражается отрицательным числом. Впрочем, практически уровень окружающего шума никогда не бывает настолько низок, чтобы удалось расслышать звук уровня —2 дБ. Указанное выше

различие в чувствительности слуха, как показано на рис. 17, становится гораздо менее заметным при возрастании звукового уровня, а когда звуковой уровень значительно превышает 130 дБ, то независимо от частоты звук вызывает болевое ощущение. Звуки с уровнем порядка 150 дБ при любой частоте немедленно приводят к повреждению слуха.

Вопросом повреждения слуха под воздействием шума мы займемся немного позже, а сейчас, пока мы еще не забыли физиологию уха, интересно ознакомиться с двумя защитными приспособлениями, созданными самой природой, которые в какой-то мере предохраняют ухо от повреждения шумом. Одно из них известно под названием ушного рефлекса. Мышца *tensor tympani* удерживает барабанную перепонку в состоянии легкого натяжения; эта мышца состоит из двух небольших мышц, которые тянут барабанную перепонку внутрь, а стремя — наружу. Если ухо подвергается воздействию шума, превышающего прибли-



Р и с. 17. Линии равной громкости для чистых тонов (для людей различных возрастов).

тельно 90 дБ, в течение времени свыше 10 мс (миллисекунд), происходит рефлекторное сокращение мышцы *tensor tympani*, в результате все механические части среднего уха становятся более жесткими, что снижает чувствительность к звукам низкой и средней частоты. Встречаются счастливики, обладающие способностью произвольно управлять ушным рефлексом: зная о предстоящем громком звуке, они могут сократить мышцу и тем самым защитить свой слух.

Второе защитное приспособление состоит в изменении характера колебаний ушных косточек. В условиях нормальной функции при шуме обычной интенсивности под воздействием колебаний слуховых косточек стремя приобретает поступательное движение, которое через основание стремени и овальное окно передается перилимфе, заполняющей верхний канал улитки. Но если кто-то, к своему несчастью, окажется с незащищенными ушами под воздействием шума свыше 140 дБ, то характер колебаний молоточка, наковальни и стремени у него резко изменится — они начнут качаться из стороны в сторону. При таком движении основания стремени перилимфа не будет двигаться вдоль улитки, а станет только перемещаться с одной стороны овального окна к другой. При этом колебания давления в перилимфе заметно уменьшатся; поэтому, как только косточки начнут колебаться подобным образом, громкость воспринимаемого звука мгновенно упадет.

Как видно из рис. 17, ухо не только значительно менее чувствительно к звукам низкой частоты, но, кроме того, неравномерно оценивает громкость на различных частотах. Можно было бы предположить, что при удвоении уровня звукового давления удваивается и громкость, однако это не так. В предыдущей главе мы говорили, что удвоение звукового давления соответствует увеличению уровня звука на 6 дБ. Если однако, мы измерим в децибелах уровень какого-нибудь звука, а потом будем усиливать его до тех пор, пока он не покажется нам вдвое громче, то обнаружим, что уровень звукового давления увеличится приблизительно на 10 дБ; иными словами, звуковое давление возросло более чем в три раза. Из гл. 2 мы знаем, что это соответствует усилению интенсивности

звука (плотности потока энергии на единицу поверхности) в 10 раз.

Как звуковой анализатор ухо обладает одним очень существенным недостатком: в присутствии чистого тона определенной частоты ухо не воспринимает звуки близких частот и меньшей интенсивности (рис. 18). Это явление, называемое маскировкой, имеет место не только при чистых тонах, но и при любых звуках. Впрочем, иногда маскировка чрезвычайно удобна: например, в тех случаях, когда желательно, чтобы какой-то разговор не был слышен посторонним, часто значительно проще ввести дополнительный звук, чем понизить звуковой уровень речи.

А как обстоит дело с другими свойствами нашего слуха: определением направления и расстояния, различением отдельных дискретных составляющих на фоне сплошного шумового спектра, а не только простого восприятия высоты отдельной заданной ноты? Оба эти свойства нашего слуха обусловлены наличием двух ушей; у людей, страдающих понижением слуха в одном ухе, эти способности отсутствуют. Как определяется направление прихода звука, понятно из рис. 19. Если только источник звука расположен не в плоскости симметрии головы, расстояния от источника звука до каждого из ушей различны и, следовательно, до

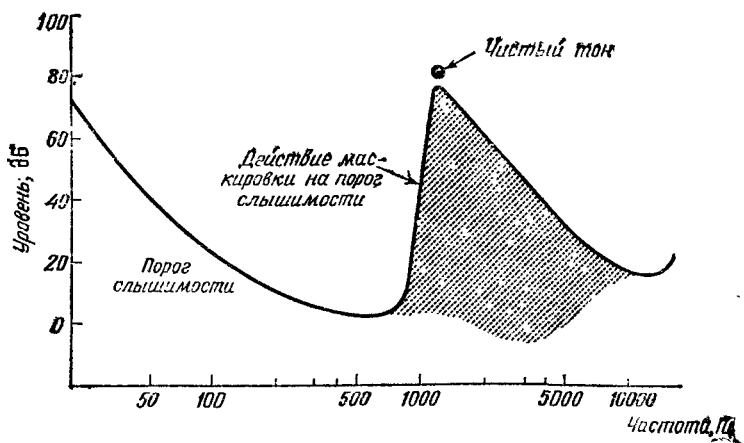
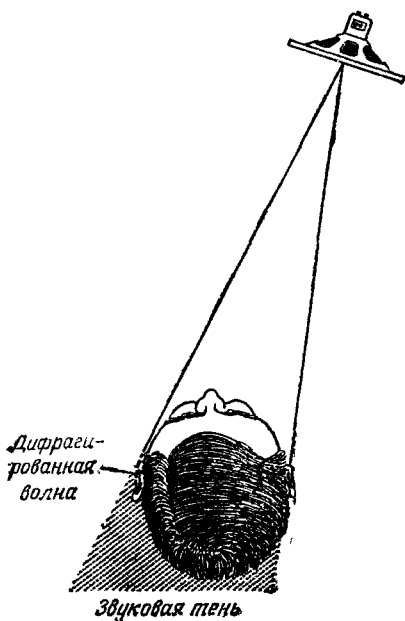


Рис. 18. Маскирующее действие чистого тона.



Р и с. 19. Определение направления прихода звука.

одного уха звук дойдет на какую-то малую долю секунды раньше, чем до другого. Мозг в состоянии «измерить» эту разницу во времени и таким образом определить направление, откуда идет звук. Однако точность такого определения не очень высока, поскольку, если расстояние до источника звука неизвестно, угол, под которым приходит звук, нельзя определить, зная только разницу во времени прихода звука. Впрочем, на основании опыта слушатель часто может определить расстояние до источника звука, исходя из его громкости, а в случае удаленных источников — учитывая частотный спектр звука, который претерпевает известные изменения в результате поглощения в атмосфере и влияния окружающей среды, что приводит к затуханию высокочастотных звуков. Кроме того, за исключением случая, когда источник расположен почти в плоскости симметрии головы, одно ухо всегда находится в звуковой тени, так сказать, «за углом», и

звук доходит до него только в результате дифракции на лицевой или затылочной части головы. Это обстоятельство усиливает разницу во времени между импульсами, поступающими в мозг от обеих ушей, а также снижает громкость звука, попадающего в затененное ухо.

Из сказанного легко понять, что установить местоположение источника низкочастотных звуков гораздо труднее, чем высокочастотных, так как в первом случае разница во времени сказывается много меньше, чем во втором. Кроме того, как мы узнаем в гл. 6, низкочастотный звук в гораздо большей степени огибает препятствия в результате дифракции, чем высокочастотный, вследствие чего разница в громкости звуков, воспринимаемой каждым ухом, еще более снижается.

Еще одно преимущество бинаурального слуха (с помощью обеих ушей) связано с основным различием между звуком, состоящим из чистых тонов, и случайным звуком, подобным в известном смысле хаотическому движению молекул воздуха. Если нужно уловить гармонический звук, например, сквозь шум ветра, человеческое ухо справляется с этой задачей много лучше любого электронного инструмента, за исключением вычислительной машины. Причина этого проста, и соответствующий процесс совершенно аналогичен корреляционному методу анализа звука с помощью вычислительной машины.

У взрослого человека расстояние между ушами составляет 150—200 мм, что, как мы уже говорили, почти всегда приводит к заметной разности фаз между звуками, приходящими к каждому из ушей. Произведение таких двух сигналов для периодического и для случайного исходного звука зависит от сдвига фаз по-разному: для периодического звука среднее значение произведения зависит от разности фаз также периодически; для случайного же звука среднее значение произведения быстро падает при увеличении разности фаз. Это обстоятельство и позволяет различать периодический или гармонический звук на фоне случайного шума. Последние абзацы, по-видимому, особенно интересны для любителей высококачественного воспроизведения звука с помощью стереофонических устройств, которые, однако, были созданы в пер-

вую очередь для того, чтобы придать воспроизводимому звуку дополнительное «измерение», что позволяет создать эффект бинаурального (или стереофонического) восприятия звука.

Не слишком отклоняясь от темы настоящей главы, рассмотрим еще одно явление, связанное с бинауральным восприятием звука, а именно чревовещание. По своей сути чревовещание значительно более сложная иллюзия, чем кажется. Как мы уже видели, наша способность определять направление звука при слушании обоими ушами имеет слабое звено (его можно ликвидировать, используя третье электронное «ухо» — микрофон): разность по времени или по фазе в восприятии звука каждым ухом указывает направление только в том случае, если известно расстояние до источника звука, но и тогда зачастую не слишком точно. Когда кто-нибудь говорит с нами, всегда более или менее очевидно, откуда именно идет звук, потому что мы видим, как человек шевелит губами и двигает челюстью. В подобных случаях мозг срабатывает безошибочно, и его невозможно убедить, что звук идет из какого-либо другого места. Но если человек сжал челюсти и говорит без каких-либо видимых признаков речи, зрительно определить расстояние до источника звука уже невозможно и процесс отыскания направления становится менее четким. Если чревовещатель достаточно ловок для того, чтобы теми или иными неакустическими средствами заставить слушателя сосредоточить внимание на каком-то не слишком удаленном предмете, мозг учтет визуальное расстояние до этого предмета при «вычислении» фазовой разности между ушами; в результате у слушателя возникает подлинное ощущение, что звук приходит именно от этого предмета. Если в качестве последнего выбрана какая-нибудь весьма эффектная подвижная кукла, то впечатление бывает достаточно сильным. Впрочем, теперь чревовещатели обычно появляются только на экранах телевизоров; здесь акустический эффект чревовещания совершенно теряется, и зритель видит лишь какое-то кукольное представление и человека, говорящего с закрытым ртом.

Конечно, уши не всегда работают так идеально, как следовало бы. Несчастный случай болезнь,

воздействие шума — все это может серьезно нарушить их функцию. Инеродное тело может прорвать барабанную перепонку, а удар по голове вызвать повреждение среднего или внутреннего уха. Болезнь может поразить среднее ухо или уничтожить чувствительные волосковые клетки на базилярной мембране, но хуже всего, когда произойдет повреждение слухового нерва и нарушатся его связи с головным мозгом — тогда бедняга, с которым это случилось, становится «глухим как пень», наступает глухота восприятия.

При всех видах глухоты, кроме последнего, медицина в состоянии помочь пострадавшему: поврежденные барабанную перепонку и слуховые косточки заменяют путем трансплантации или вживления искусственных косточек из пластмассы. Если волосковые клетки в улитке начинают терять чувствительность — может помочь усиление звука, поступающего в наружный слуховой канал; но когда погибает слуховой нерв — ухо как орган чувств становится совершенно бесполезным. Я надеюсь, что когда-нибудь станет возможным такое возбуждение других участков нервной системы, которое приведет к «искусственному» слуху. Ощущение боли чем-то сходно со слухом. Боль часто имеет «тональную характеристику»: у булавочного укола — высокий тон, у головной боли — низкий. Возможно, уже не за горами то время, когда путем возбуждения соответствующих участков нервной системы несчастным людям с погибшим слуховым нервом вновь будет дана возможность воспринимать звук. Слепому, безусловно, можно дать простейший вид «зрения», используя его спину как своего рода телевизионный экран, и действуя на различные участки спины с определенными силами в соответствии с находящимися перед ним предметами. В настоящее время исследуется также возможность введения сигналов непосредственно в мозг.

Ухо может быть повреждено в результате болезни, но гораздо тревожнее тот факт, что только у малого числа взрослых мужчин слух не поврежден шумом; поэтому, в частности, почти невозможно установить, какой слух следует считать «нормальным» для мужчин. Чем это вызвано? Здесь можно назвать несколько причин. Мало кто из мужчин, достигших сред-

него возраста, ни разу в жизни не пользовался огнестрельным оружием, причем с незащищенными ушами; многие участвовали в военных действиях. Хотя в настоящее время во всех видах войск ясно отдают себе отчет в том, какую опасность представляет шум, и даже вносят своими работами немалый вклад в изучение этого вопроса, многие любители стрелкового спорта и охотники забывают, что каждый выстрел — это еще один шаг к тугоухости. В военных школах мальчики подвергаются действию шума ружейных выстрелов, что представляет серьезную опасность для слуха, особенно на закрытых стрельбищах; 12-калиберные охотничьи ружья приносят не меньше вреда, чем боевые винтовки. Ушные протекторы, о которых пойдет речь в гл. 14, обязательны для всех, кто пользуется любым огнестрельным оружием. Однако при этом необходимо соблюдать величайшую осторожность, поскольку такая защита ушей может привести к несчастному случаю, если помешает человеку услышать предостерегающий окрик.

Самая распространенная и серьезная причина тугоухости, вызванной шумом, — это воздействие высоких уровней шума на рабочих местах, будь то кабина дизельного грузовика, литейный завод или другие самые различные предприятия — от типографии до фабрики синтетических материалов. Если исключить взрывы и стрельбу, то повреждение слуха шумом вне связи с работой — событие маловероятное. Как бы ни раздражал человека шум самолетов или наземного транспорта, он вряд ли может вызвать физиологическое повреждение слуха. Возможно, исключение составляют мотоциклы некоторых марок и, как мы уже говорили, оркестры поп-музыки. Как же именно воздействует шум на свои жертвы? Какой уровень шума следует считать опасным? Обратимы ли повреждения слуха?

Шум может повлиять на слух трояким образом: вызвать мгновенную глухоту или повреждение органа слуха; при длительном воздействии — резко снизить чувствительность к звукам определенных частот, и, наконец, шум может снизить чувствительность слуха на ограниченное время — минуты, недели, месяцы, после чего слух восстанавливается почти полностью.

Первый тип поражений — акустическая травма — обычно вызывается воздействием шума очень большой интенсивности, например взрыва. По очевидным причинам установить экспериментально минимальный уровень шума, приводящего к повреждениям такого рода, невозможно; но, по-видимому, импульсный шум, превышающий 150 дБ, вызывает травму мгновенно. При этом барабанная перепонка может оказаться непоправимо разорванной, а слуховые косточки сломанными или смещенными. Однако не исключено, что улитка все-таки уцелеет, поскольку повреждение косточек может помешать передаче всей энергии шума в перилимфу.

Говоря об импульсном шуме, следует отметить одно существенное обстоятельство, связанное со сказанным в предыдущей главе. Большая часть шумомеров определяет не максимальное значение давления в звуковой волне, а среднеквадратичное, то есть некоторую усредненную величину. Это удобно для измерения непрерывного шума и дает результаты хорошо совпадающие с субъективной слуховой оценкой шума; однако при измерении импульсного шума, когда нередко наблюдается всего один максимум с очень крутыми подъемом и падением, среднеквадратичная величина дает безнадежно заниженную оценку уровня шумового импульса. К тому же быстрое действие обычных шумомеров, как правило, недостаточно для того, чтобы стрелка успела дойти хотя бы до среднеквадратичной величины. Для измерения импульсного шума лучше всего либо получить изображение звуковой волны на электронно-лучевом осциллографе и измерить максимальный уровень по делениям на экране, либо воспользоваться специальным импульсным шумомером.

Взрывы не единственный источник импульсного шума. Удар молотом по стальной пластине также производит значительный импульс шума, хотя и не столь высокого уровня, как взрыв. Импульсы меньших интенсивностей тоже травмируют слух, но вызывают повреждения не в среднем, а во внутреннем ухе, как и непрерывный шум, о котором речь еще впереди. Что касается импульсного шума, то здесь человек в своей эволюции явно отстал от развития техники. Как

мы уже знаем, в человеческом ухе есть два защитных устройства: одно из них — ушной рефлекс. К несчастью, он срабатывает в течение примерно 10 мс (миллисекунд), а за это время импульсный шум уже может вызвать травму. Но подобный импульсный шум с очень коротким временем нарастания почти никогда не встречается в природе, он порождается только человеком. Следовательно, природа вовсе не «зазевалась», допустив задержку ушного рефлекса, а просто «не приняла в расчет» обстоятельств, не существовавших в течение миллионов лет. Следующим шагом эволюционного процесса в этом направлении, несомненно, будет развитие способности к произвольной активации рефлекса при первых же признаках угрожающе громкого шума у значительно большего числа людей, чем число «счастливчиков», обладающих этой способностью уже сегодня. Как мне кажется, можно научиться произвольно вызывать у себя ушной рефлекс. Иногда нетрудно уловить момент, когда этот рефлекс вступает в действие — при этом часто слышно слабое щелканье, без сомнения связанное со смещением ушной серы около барабанной перепонки при натяжении последней. За этим щелчком следует понижение чувствительности слуха.

Еще один мощный источник импульсного шума — это звуковой хлопок, создаваемый самолетом. Прежде всего следует сказать, однако, что, по общепринятому мнению, для разрыва барабанной перепонки требуется пиковое избыточное давление в $35\,000\text{ Н/м}^2$, а для повреждения легких — $100\,000\text{ Н/м}^2$. Избыточное же давление, создаваемое сверхзвуковыми самолетами, очень редко превышает 100 Н/м^2 . Избыточное давление свыше 6000 Н/м^2 люди переносят без каких-либо вредных физиологических последствий, так что здесь мы еще имеем достаточный запас «прочности». Однако психологическая реакция становится значительной, и люди начинают выражать свое неудовольствие вслух уже приблизительно при 50 Н/м^2 ; при избыточном давлении в $50\text{—}100\text{ Н/м}^2$ изредка возникают мелкие повреждения зданий, но общественное возмущение становится громогласным.

Может показаться странным, почему этот тип шума не выражают в децибелах, как все прочие шумы.

Разумеется, сделать это вполне возможно. Тогда приведенные цифры преобразуются следующим образом: 185 дБ — разрыв барабанной перепонки, 194 дБ — повреждение легких, 134 дБ — оглушительное и 128 дБ — умеренное негодование общества (все эти цифры взяты относительно уровня 2×10^{-5} Н/м²). Однако звуковой хлопок настолько сильно отличается от обычного шума и наступает так внезапно, что данные, выраженные в децибелах, только создают неясность. Кроме того, если требуется установить степень воздействия шума на людей и здания, необходимо знать действительную величину максимального давления, с которым действует звуковая волна. О причинах звукового хлопка мы поговорим в гл. 6.

Однако повреждение слуха импульсным шумом — это еще не главная причина для беспокойства. Гораздо более пагубны для слуха длительные периоды непрерывного воздействия шума большой интенсивности. Этот вид шума действует двояко, причем первый вид воздействия может и не причинить серьезного вреда. Так, если человек подвергается более чем несколько минут воздействию звука средней или высокой частоты с уровнем около 90 дБ или немного выше, он испытывает после этого так называемый «временный сдвиг порога». Нормальный порог слухового восприятия — это самый низкий уровень, при котором данный человек еще слышит звук той или иной частоты; после воздействия сильного шума этот порог заметно повышается. Допустим, человек в нормальных условиях слышит звук частоты 4000 Гц при уровне звукового давления в 5 дБ. Уровень фонового шума обычно много выше 5 дБ, и поэтому измерения порогов слухового восприятия следует производить в специально оборудованных помещениях с очень низким уровнем окружающего шума, подавая звуковые сигналы через головные телефоны. Эта методика называется аудиометрией; она позволяет получить кривую индивидуальной чувствительности слуха, или аудиограмму. Обычно на аудиограммах отмечают отклонения от нормальной чувствительности слуха, а не действительный порог слышимости.

Подвергнем испытуемого в течение 10 мин воздействию шума в частотной полосе 1200—2400 Гц при

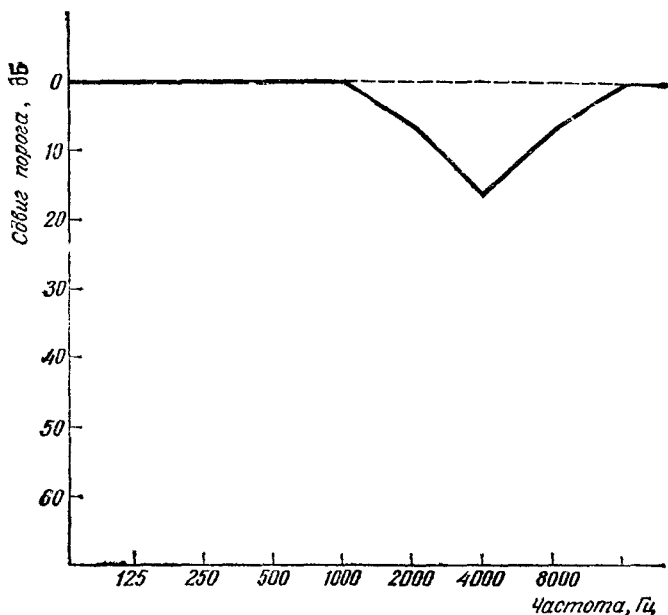


Рис. 20. Аудиограмма типичного сдвига порога слышимости после кратковременного воздействия шума.

уровне звукового давления, скажем, 100 дБ; немедленно после прекращения шума у него обнаружится понижение чувствительности слуха. Если раньше он слышал звук в 4000 Гц при уровне в 5 дБ, то, чтобы он смог его услышать после шумового воздействия, звук придется усилить до 20 дБ. Однако такое понижение слуха продолжится не более получаса, после чего остаточный сдвиг порога станет незаметным. На рис. 20 представлена типичная аудиограмма, снятая немедленно после такого шумового воздействия. На ней можно заметить некоторое несоответствие частот: сдвиг порога сильнее всего выражен для частоты 4000 Гц, хотя шум, вызвавший сдвиг, звуков этой частоты не содержал. Такое несоответствие характерно для понижения слуха, вызванного шумом, и причины его пока не вполне ясны. Почти всегда наибольший сдвиг порога слышимости наблюдается на более высокой частоте, чем частота шума, вызвавшего сдвиг.

С увеличением времени воздействия и при повышении уровня шума увеличивается временный сдвиг порога и удлиняется период восстановления. Если, например, шум в 100 дБ при частотах 1200—2400 Гц длился 100 мин, то временный сдвиг порога превзойдет 30 дБ, а для восстановления нормального слуха потребуется около 36 ч.

Если воздействие сильного шума не происходит систематически, то остаточный эффект столь незначителен, что им можно пренебречь. Однако множество людей во всем мире постоянно подвергаются на производстве или других работах воздействию высоких уровней шума; эффект перестает быть временным, и с годами понижение слуха становится тяжелым и хроническим. Обычно жертвы шума склонны отрицать, что у них не все благополучно со слухом. Мне приходилось бывать на многих шумных заводах, где говорили: «Да, действительно, уровень шума у нас высокий, но мы привыкли и наша «терпимость» к шуму возросла». Чепуха! Происходит вот что: человек приходит на работу, где уровень шума высок, и, конечно, у него нет привычки к шуму. В конце первого рабочего дня у него возникнет сильный временный сдвиг порога, который, возможно, будет сопровождаться звоном в ушах («тинитус»). Если он поедет домой на своей машине, то обнаружит, что ее мотор стал шуметь как двигатель машины более высокого класса, ибо он не услышит дребезжания и скрипа, в особенности шумов, близких по частоте к 4000 Гц. Дома голос жены будет звучать так же громко, как обычно, но у него возникнет ощущение, что она говорит как бы через одеяло. Если у него нет других нарушений слуха, то он заметит, что звучание высокочастотных звуков неестественно усилилось; это обусловлено тем, что сравнительно со значительной потерей чувствительности к частотам около 4000 Гц потеря ее на более высоких частотах ничтожна. Шум окажет действие и на психику — человек почувствует сильную усталость.

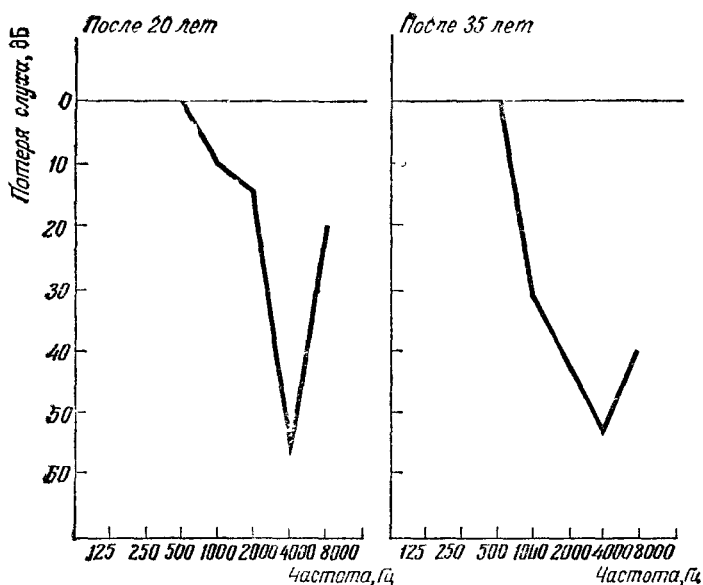
На следующее утро слух у него частично восстановится, звон в ушах прекратится, а усталость пройдет после сна. Второй и последующие дни работы повлияют на него гораздо меньше. У него уже уста-

новится сдвиг порога слышимости, и поэтому шум покажется ему не таким громким. Он привыкнет к некоторому понижению слуха и, возможно, перестанет испытывать звон в ушах. Если спустя некоторое время, вплоть до одного года, — это зависит от характера и уровня шума, — этот человек оставит шумную работу и перейдет на тихую, через несколько недель, а возможно, месяцев его слух восстановится в удовлетворительной степени. Однако, если он не изменит работы, наступит момент, когда восстановление слуха будет уже невозможно, и в конце концов он сам начнет замечать, что острота слуха у него понизилась и ему стало труднее разбирать слова. Он обнаружит, что понимает, что говорится по телевизору, только тогда, когда звук очень громкий, даже по его собственному ощущению.

На этой стадии повреждение стало стойким и необратимым. С годами провал в области 4000 Гц на аудиограмме этого человека все более углубляется, а затем и расширяется — чувствительность слуха снижается и на других частотах. К старости он станет совсем тугоухим (рис. 21).

Итак, мы обсудили симптомы. А что можно сказать о причинах? Какой силы и какого рода шум причиняет повреждения? Проводились обширные исследования, и в 1972 г. Министерством труда был выпущен Кодекс правил по уменьшению дозы шума, получаемой работающими по найму, разработанный на основе наблюдений случаев повреждения слуха у лиц, занятых в промышленности. Эти исследования выполнены проф. Бэрнсом из Медицинского института (Чаринг-Кросс) и доктором Робинсоном из Национальной физической лаборатории. Пределы допустимого шума, указанные в кодексе, были установлены с оглядкой на реальность соблюдения их предпринимателями; некоторые эксперты считают эти пределы завышенными на 5 дБ. А если бы было возможно вообще пренебречь практическими трудностями, эти пределы следовало бы понизить на 10 дБ.

В предыдущей главе мы говорили об эквивалентном уровне непрерывного шума, обозначаемом $L_{ЭКВ}$. Эта шкала особенно удобна в тех случаях, когда необходимо установить критерий риска повреждения



Р и с. 21. Типичные аудиограммы, показывающие потерю слуха у ткачей.

слуха, поскольку она дает готовый рецепт для учета очень различных уровней шума, с которыми сталкивается разнорабочий, который в течение коротких периодов времени находится на разных участках завода с разными уровнями шума. В простейшем случае, когда рабочий проводит вблизи одной и той же машины 8 ч в день, предельный уровень шума, допускаемый кодексом, равен 90 дБА; так как в этом случае шум все время постоянен, то и по шкале $L_{\text{экв}}$ этот предел равен 90 дБА. Если работающий подвергается воздействию шума всего четыре часа в день, а остальное время работает в условиях тишины, предельный уровень шума, установленный кодексом, равен 93 дБА, потому что при сокращении вдвое времени воздействия шума суммарная величина $L_{\text{экв}}$ сохраняется, если увеличить вдвое энергию шума (то есть повысить уровень на 3 дБ). В кодексе приведен также метод вычисления $L_{\text{экв}}$ для случая суммарного воздействия различных уровней шума в течение раз-

ных промежутков времени, но самый простой, хотя и более дорогой способ учитывать все вариации уровней шума со временем — это измерение $L_{\text{экв}}$ при помощи шумомеров специальной конструкции. Некоторые из них включают небольшие съемные элементы, так называемые дозиметры, которые обследуемый носит на себе; время от времени их показания снимаются с помощью основного устройства, и таким образом определяется доза шума. В табл. 5 приведены предельно допустимые дозы воздействия различных постоянных уровней шума в виде максимального времени, в течение которого можно ежедневно находиться под воздействием этого шума без риска повреждения слуха.

Не все люди одинаково реагируют на шум. Одна и та же доза шумового воздействия у одних вызывает повреждения слуха, у других — нет, у одних эти повреждения могут быть тяжелее, чем у других. Поэтому любой предел допустимого шума всегда следует оценивать исходя из числа людей (в процентах), получающих после воздействия шума повреждения более слабые, чем какой-то выбранный предел. Пределы, взятые из кодекса и представленные в табл. 5, гарантируют, что у 90% людей указанные дозы шума вызовут остаточное понижение слуха менее чем на 20 дБ после 50 лет работы при указанной дозе

Таблица 5

Критерий риска повреждения слуха, полная ежедневная доза воздействия

Продолжительность воздействия	Предельно допустимые дозы, дВА
8 ч	90
4 ч	93
2 ч	96
1 ч	99
0,5 ч	102
0,25 ч	105
7 мин	108
4 мин	111
2 мин	114
1 мин	117
30 с	120

шумового облучения. При снижении пределов на 5 дБ эта цифра увеличится до 93%, а при снижении на 10 дБ — до 96%. Потеря слуха более чем на 20 дБ начинает серьезно мешать человеку, когда к этому добавляются еще возрастные изменения слуха. Понижение слуха меньше чем на 20 дБ не очень существенно, а на 10 дБ — практически неощутимо.

Как правило, шум, настолько громкий, что невозможно разговаривать, не переходя на крик, уже несет опасность повреждения слуха. Можно утверждать, что если человек, не работающий систематически в шумовой зоне, получит после пребывания в ней временный сдвиг порога слышимости, то уровень шума в зоне скорее всего превышает 90 дБА. Вообще, независимо от продолжительности воздействия оставлять уши незащищенными при уровне шума в 120 дБ неразумно, а при уровне, достигающем 135 дБ, — опасно. Даже при пользовании ушными протекторами абсолютный предел допустимого уровня шума составляет 150 дБА, а так как многие виды протекторов снижают уровень всего на 20 дБА или даже меньше, то ношение их не уничтожает опасности повреждения слуха, если вы находитесь весь день в зоне сильного шума. Как мы увидим в гл. 11, это не единственный недостаток ушных протекторов, препятствующий решению проблемы повреждения слуха шумом.

По-видимому, шумы, состоящие из чистых тонов, более опасны, чем широкополосные шумы; поэтому на заводах, где машины или какие-либо процессы производят шумы одного тона или группы тонов очень большой громкости, предельные уровни шума должны быть на 5—10 дБА ниже, чем это предусмотрено кодексом.

Понижение слуха, вызванное производственным шумом, иными словами, профессиональное повреждение слуха, — пожалуй, самое серьезное воздействие шума, но оно не единственное. Шум оказывает на человека много других вредных воздействий: некоторые виды шума и вибрации вызывают заболевания; шум может серьезно нарушить связь, он нередко приводит к несчастным случаям; при постоянном раздражающем воздействии шум может вызвать психические нарушения; шум мешает заснуть и прерывает

сон, и результаты этого могут быть весьма серьезными. Короче говоря, шум ухудшает условия жизни человека.

Еще не все вредные воздействия шума и его сообщника — вибрации раскрыты до конца. Известно, что люди, работающие с вибрирующими ручными инструментами, страдают заболеваниями, известными как «белые пальцы», «мертвая рука», «явление Рейно». Симптомы заболевания — боль, онемение и цианоз пальцев, как при действии холода. Очень часто наблюдается и повреждение суставов и костей рук, причем суставы распухают и теряют подвижность. Возможно, что повреждения костей и суставов наступают в результате повторных резких ударов, которым подвергаются кисти рук при работе с ударными механизмами, а другие симптомы вызываются высокочастотными колебаниями. Есть у меня такая, казалось бы, невинная машинка — ручной пылесос для автомобиля, совершающий вибрации с частотой 290 Гц. Уже через полчаса работы он вызывает онемение и слабое покалывание в руке. Я обнаружил также, что вибрация кисти может вызвать временный сдвиг порога слышимости вследствие передачи колебаний через кости руки и шеи во внутреннее ухо. На сей раз виновником оказался ручной вибрационный гравировальный резец с частотой вибраций 50 Гц. Поработав этим резцом в течение получаса и надев ушные протекторы, чтобы исключить возможность сдвига порога звуком, передающимся по воздуху, я нашел у себя временный сдвиг порога, эквивалентный сдвигу, возникающему при том же времени воздействия высокочастотного шума в октавной полосе с уровнем около 90 дБ. Если подобный инструмент может привести к временному сдвигу порога, он, несомненно, может вызвать и остаточное понижение слуха у людей, работающих с ним постоянно. Наиболее вредное действие обычно оказывают гармоники рабочей частоты механизма, а эти гармоники даже у пневматического сверла достигают нескольких кГц. Такая вибрация повреждает периферические нервы и капилляры пальцев и кистей рук.

Другие вредные воздействия шума и вибраций на организм в настоящее время не считаются серьез-

ными, за исключением воздействия звуков очень высоких или очень низких частот, а также очень большой интенсивности. Шум очень большой интенсивности может вызвать резонанс в полукружных каналах — органах равновесия, находящихся во внутреннем ухе, что приводит к головокружению и тошноте. Ультразвуковой шум с частотой, превышающей границу слышимости, также может вызвать тошноту, а инфразвук и очень низкочастотный слышимый шум возбуждают резонансы во внутренних органах, включая сердце и легкие. Акустическим возбуждением с определенной частотой и достаточно большой амплитудой можно остановить пульсацию сердца. Сильный низкочастотный шум затрудняет дыхание.

Из-за резонансов, возбуждаемых в лицевых и черепных костях слышимыми звуками средних частот, их воздействие чрезвычайно неприятно даже при употреблении ушных протекторов: утрачивается ясность мысли, возможно, вследствие резонансных явлений, возникающих в головном мозге; нарушается координация движения конечностей, что, возможно, вызвано вибрацией мозга и периферических нервов. Если по той или иной причине человек вынужден находиться в зоне весьма интенсивного шума, он должен по меньшей мере надеть звукозащитный шлем, а не ограничиваться ушными протекторами.

Важны также психологические и другие непатологические последствия шумовых воздействий, но они не всегда поддаются измерению. Как измерить степень раздражения, испытываемого человеком? Сколько вреда приносит плохое настроение? Раздраженные люди становятся иногда неестественно вспыльчивыми или принимают совершенно неправильные решения, которые подчас могут привести к катастрофическим последствиям. У жертв шума может развиваться депрессия или склонность к психосоматическим заболеваниям; разрушаются семьи, возникают несчастные случаи, осложняются отношения на производстве.

Шум вызывает и обычную усталость и неспособность сосредоточиться, также ведущие к снижению производительности труда и несчастным случаям. Измерить зависимость производительности труда от шума не просто: как только мы отбираем группу об-

следуемых и начинаем экспериментировать, изменяя окружающие условия, будь то акустика, освещение или отопление, — производительность труда испытуемых немедленно возрастает просто от того, что они ощущают заботу о своем здоровье и стремление как-то им помочь. Однако мало кто решится отрицать, что люди, работающие в условиях сильного шума, чаще ошибаются и, следовательно, их труд менее производителен и эффективен. Установлено также, что при снижении уровня шума уменьшается число невыходов на работу.

Вероятно, расстройство сна — самый серьезный ущерб, который шум приносит человеку, исключая, конечно, повреждения слуха. Для эффективной работы, умственной и физической, почти всем нужен полноценный сон. Следует помнить, что, когда человек спит, его органы чувств, в том числе и уши, остаются «включенными». Если во время сна мы не слышим звуков низкого уровня, то это вовсе не значит, что уши не улавливают их, а просто головной мозг иначе реагирует на слуховые раздражители. Как известно, даже под наркозом нервные импульсы продолжают передаваться в высшие центры головного мозга. Шум низкого уровня может не оказывать видимого влияния на сон, но факт восприятия шума выявляется при внимательном анализе электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Во время глубокого сна щелчок в 50—60 дБА вызывает легко идентифицируемый ответ коры головного мозга. Любопытно, что метод ЭЭГ позволяет осуществить аудиометрию даже помимо желания исследуемого, так как ответы коры совершенно произвольны. Шумы более высоких уровней вызывают весьма выраженные изменения ЭЭГ.

Проще всего считать, что влияние шума на сон сводится к тому, что под действием шума человек пробуждается. Разумеется, это очень важный момент, но многие недооценивают значения вынужденного сдвига глубины сна, еще не приводящего к пробуждению. Как показывают эксперименты, если на спящего человека, едва достигшего стадии самого глубокого сна, воздействовать так, чтобы, не разбудив, перевести в стадию менее глубокого сна, результат оказывается таким же, как и при полном пробуждении.

Внезапное пробуждение от глубокого сна может сопровождаться сердцебиением. Если человека будить каждый раз, когда он доходит до стадии сновидений (легко определяемой по быстрым движениям глаз), и таким образом лишить снов, у него развиваются симптомы, приводящие в конце концов к галлюцинациям и дезориентации.

Шум вызывает как сдвиги глубины сна, так и полное пробуждение. Хорошо известно, что людей в возрасте старше 60 лет легче разбудить или перевести в состояние менее глубокого сна, чем детей или людей среднего возраста. Различия в реакции резко выражены; установлено, что шум, который будит лишь 5% детей 7—8-летнего возраста, вызывает полное пробуждение 70% людей в возрасте 69—72 лет. Разбуженный пожилой человек труднее засыпает вновь, чем ребенок или человек средних лет. Доказано также, что женщины легче просыпаются от шума, чем мужчины.

Если сопоставить изменения сна, вызываемые шумом, с нормальным процессом сна, легко понять, как значительна роль окружающего шума. Известно, что для спящего наиболее благоприятна стадия глубокого сна, а для того чтобы достигнуть ее, взрослому человеку требуется около часа, и очевидно, что нескольких кратковременных шумовых раздражений в течение ночи достаточно, чтобы вызвать серьезное расстройство полноценного сна. Такое же значение имеет и стадия сновидений, частые пробуждения во время которой могут сильнее всего отразиться на качестве сна.

Исследовалось также вторичное проявление действия окружающего шума на сон, а именно удлинение срока, необходимого для наступления стадии глубокого сна. В одном эксперименте было обнаружено, что в условиях тишины между моментом, когда человек ложится в постель, и наступлением глубокого сна проходило в среднем 26 мин, а при наличии транспортного шума это время составляло более 50 мин. В известных пределах головной мозг способен компенсировать нарушения качества сна в условиях шума и недостаток глубокого сна в начале ночи возместить увеличением продолжительности стадии глу-

бокого сна и большей его устойчивостью в более поздние часы (порядок, обратный нормальному).

Если говорить о пределах допустимого ночного шума, то следует заметить, что шум постоянного уровня меньше влияет на сон, чем шум с колебаниями уровня или прерывистый шум. Значит, важнее попытаться предотвратить несколько коротких «вспышек» шума, чем стремиться понизить общий шумовой уровень. Здесь, как и в других ситуациях, наличие подходящего фона может оказать действенную помощь в случаях, когда нельзя избежать прерывистого шума большого уровня. В тропиках, где вделанные в окна шумные устройства для кондиционирования воздуха распространены очень широко, человеку, безусловно, гораздо легче спать, если такое устройство не управляется терморегулятором, а работает непрерывно.

При фоновом шуме в 35 дБА отдельные шумовые максимумы с уровнем в 45—50 дБА, хотя и кажутся слишком высокими, практически вполне приемлемы для 80% спящих людей; при увеличении числа шумовых максимумов этот предел следует понизить.

Наконец, шум порождает еще одну проблему — нарушение связи. Во многих житейских ситуациях очень важно, чтобы один человек мог быстро и точно передать информацию другому. Тысячи лет устное слово было основным средством связи, и, хотя сейчас развитие электроники несколько снизило эту его роль, речь по-прежнему чрезвычайно важна для всех нас. Нарушение связи может привести, во-первых, к снижению эффективности труда и, во-вторых, к гораздо более серьезным и даже фатальным последствиям. Нередко несчастные случаи можно предотвратить криком: «Поберегись!» (если прохожему грозит, например, опасность свалиться в яму) или более длинным предостережением: «Провода под током!». Очевидно, если окружающий шум мешает услышать такие предостережения, люди погибнут по причинам, предотвратить которые было возможно.

Отчего так шумно? Механизмы и шум

Каждому ясно, что проблема чрезмерного шума, возникшая в наши дни, вызвана не трубами, в которых ходят поршни, и не пульсирующими баллонами. Не повинны в ней ни блок-флейты, ни скрипки, ни оркестровые тарелки. Однако до сих пор мы говорили только об этих источниках звука. Где же истинные виновники шума? Почему они шумят? И при чем тут блок-флейты, скрипки и тарелки?

Рассмотрим сначала механизмы вообще. Вернемся к музыкальным инструментам и вспомним, что мы разделили их на три группы: издающие звук в результате аэродинамических процессов, при вынужденных механических колебаниях и при ударе или соударении тел. Мы называли и три этапа возникновения звука: первоначальное, или исходное, возмущение, усиление или изменение этого возмущения и излучение звука. Как мы выяснили, без исходного возмущения вообще нельзя создать никакого звука. Для блок-флейты таким возмущением служит образование вихрей вокруг вдуваемой струи воздуха, для скрипки — трение смычка о струны, для тарелок — внезапное изгибание и деформация при соударении. А что происходит с механизмами? Каково исходное возмущение у них?

Возьмем паяльную лампу, простое устройство без подвижных частей, — это пример чисто аэродинамического источника звука. В такой лампе керосин под давлением распыляется и, проходя через узкое отверстие, образует струю легко воспламеняемых паров. Эта струя непрерывно возгорается, и газообразные продукты горения выбрасываются из сопла. При работе паяльной лампы шум возникает по трем при-

чинам. Прежде всего, когда струя паров вырывается из отверстия, образуются такие же вихри, как при выходе воздуха из мунштука блок-флейты. Возникает шипящий звук. Далее, после всасывания воздуха в камеру сгорания через широкие отверстия, расположенные вокруг струи, последняя загорается на небольшом расстоянии от места ее выхода. Смесь горючего и воздуха уже турбулизована, и поэтому горение — неустановившийся процесс. Давление, создаваемое расширяющимися газообразными продуктами горения, неравномерно и неустойчиво, и это создает шум горения. Если измерить колебания интенсивности света от пламени паяльной лампы и сравнить их с колебаниями давления воздуха, другими словами, со звуком, между ними обнаружится удивительно много общего. Наконец, еще больший шум обусловлен тем, что у конца камеры сгорания быстро движущийся турбулентный поток горячего газа сразу начинает смешиваться с холодным и неподвижным окружающим воздухом: образуются вихри и потоки, вызывающие беспорядочные колебания давления и усиливающие рев горячей лампы.

Мы описали один из видов аэродинамического шума, но, по-видимому, значительно чаще нам приходится сталкиваться просто с шумом взрыва. В этом случае вместо непрерывного регулируемого процесса сгорания горючего происходит внезапное сгорание большого количества легко воспламеняемого вещества, сопровождаемое резким увеличением давления и большой турбулентностью. Будет ли возникающий шум звучать, как гул или резкий удар, зависит от ряда обстоятельств: от скорости возгорания, от того, происходит ли оно в открытом или замкнутом пространстве, например в патроне; в последнем случае при вылете пули образовавшийся в гильзе сжатый газ вырывается наружу внезапно. Внезапное высвобождение сжатого воздуха или газа может происходить не только при взрывах: оно, например, происходит в выпускном окне пневматического перфоратора.

Возможны и другие виды исходного возмущения аэродинамического происхождения. Двигается ли воздух мимо неподвижного тела, или тело перемещается в неподвижном воздухе — всегда образуются вихри,

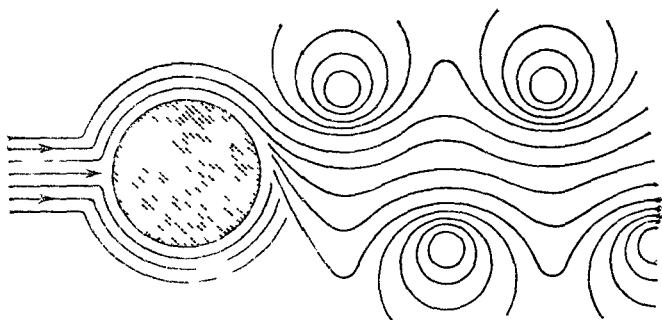


Рис. 22. Вихреобразование в потоке, обтекающем круговой профиль.

даже если тело обладает обтекаемой формой, как, например, крыло самолета. На рис 22 изображена картина обтекания тела. Возьмем простейший случай движения шара в неподвижном воздухе: резкое падение давления в спутной струе позади тела вызывает турбулентность, а значит, и шум. Чем лучше аэродинамические свойства движущегося тела, тем слабее шум. Но движущееся тело не только создает турбулентность в спутной струе, для того чтобы пройти через воздушную среду, ему приходится расталкивать воздух в стороны. Это вызывает резкое увеличение давления по обе стороны движущегося тела или, при движении самолетного крыла, увеличение давления с одной стороны и уменьшение — с другой. Изменения давления создают звуковую волну, непрерывно убегающую со скоростью звука от движущегося тела. Когда через определенную точку в воздухе с постоянной скоростью проходят в правильной последовательности движущиеся тела, то прохождение тел создает вблизи этой точки последовательные импульсы. Если тела движутся с достаточной скоростью, такая последовательность импульсов создает слышимый звук. Так происходит, например, при вращении пропеллера. при прохождении каждой лопасти через заданную точку воздуху сообщается импульс и следующие друг за другом импульсы распространяются в воздухе в виде звуковых волн. Если четырехлопастный пропеллер вращается со скоростью 1200 об/мин (20 об/с), то его лопасти будут проходить через любую выбран-

ную нами точку 80 раз в секунду, создавая звук с основной частотой 80 Гц

Пульсации давления, вызываемые движущимися лопастями, не являются абсолютно чистыми тонами, то есть синусоидальными волнами. Во второй главе мы уже встречались с теоремой Фурье, которая гласит, что каждый конечный и непрерывный периодический процесс можно разложить в простой ряд синусоидальных волн с соответствующими фазами и амплитудами. Импульсы давления, создаваемые движением лопастей пропеллера, — это конечные, непрерывные и периодические колебания, а следовательно, их можно разложить в ряд Фурье. Проведем это, мы обнаружим, что шум пропеллера действительно состоит из ряда гармоник.

Описанное явление будет выражено еще отчетливее, если в непосредственной близости к вращающимся лопастям находится неподвижное тело (элемент статора). Воздух, закручиваемый лопастями, проходя мимо неподвижного тела, оказывает то же действие, как если бы двигалось само тело. Но дело не только в том, если всунуть палец между лопастями и неподвижным телом, его бы тут же раздавило или оторвало, вот так резко сжимается воздух, заключенный между вращающимися и неподвижными элементами конструкции, и такое сжатие вновь создает звуковую волну. Наконец, наличие в конструкции неподвижных элементов приводит к тому, что вращающаяся лопасть, проходя между ними, встречает воздух, движущийся с разной скоростью позади элементов статора: воздух почти неподвижен, а между ними он движется довольно быстро. Изменение скорости порождает изменение давления, а это уже и есть звук. Частота шума, возникающего при взаимодействии вращающихся и неподвижных элементов конструкции, зависит от числа лопастей и скорости вращения. Все сказанное справедливо не только для воздуха, но и для жидкости, только термин «аэродинамический» придется заменить на «гидродинамический».

Пока мы говорили только об исходном возмущении в источниках звука и не касались ни усиления, ни излучения, однако мы скоро увидим, что в аэродинамическом шуме все эти три явления зачастую

образуют один процесс. А что можно сказать о вынужденных механических колебаниях? Здесь дело обстоит совсем иначе. При механических колебаниях процесс излучения звука часто (к счастью!) не эффективен. Самый простой вид исходного возмущения при вынужденных колебаниях создается движением какого-либо тела по неровной поверхности. Движение карандаша по бумаге не произведет много шума, но про движение зубила по точильному колесу этого не скажешь. Нетрудно понять процесс создания шума в этих случаях: поверхность листа бумаги изобилует случайными шероховатостями малых размеров, у точильного колеса эти шероховатости много крупнее. При движении по неровной поверхности карандаш и зубило приходят в колебательное движение вверх и вниз, в результате и возникает шум.

Описанные колебания имеют беспорядочный характер. В отличие от них колебания, обусловленные вращением неуравновешенных элементов какого-либо механизма, регулярны; они вызывают периодическое смещение механизма в целом. Простейший пример — груз, расположенный на конце вращающегося стержня. Центробежная сила действует в направлении стержня; если стержень вращается с постоянной скоростью, а механизм в целом может свободно колебаться только в одном направлении, например вверх-вниз, то под действием центробежной силы он будет смещаться из положения покоя на расстояние, пропорциональное косинусу угла между стержнем и направлением смещения. Поскольку косинус равнозначен синусу, сдвинутому по фазе на 90° , то в этом случае результирующее колебание создает «чистый тон», так как колебания давления при чистом тоне образуют синусоидальную волну. Разумеется, у многих механизмов силы, обусловленные неуравновешенностью, значительно сложнее, чем силы, возникающие при вращении одного ротора. Одна из причин их сложности состоит в том, что реальный механизм никогда не совершает колебаний только вверх-вниз; он обычно колеблется в шести различных направлениях: вверх-вниз, из стороны в сторону, вперед-назад, вращаясь вокруг вертикальной и двух горизонтальных осей (с боку на бок и в продольном направлении). По-

этому результирующие колебания механизмов с большим числом неуравновешенных вращающихся деталей, как правило, чрезвычайно сложны.

Среди сил, способных возбуждать колебания, особую категорию составляют электромагнитные силы. С колебаниями, создаваемыми этими силами, чаще всего приходится встречаться в электромоторах; силы взаимодействия между якорем и электромагнитом, то есть между ротором и статором, вызывают деформации и вибрации частей мотора. Впрочем, обычно основной шум в электродвигателях имеет аэродинамическое происхождение и обусловлен взаимодействием прорезей в роторе и статоре.

В трансформаторах магнитострикция вызывает деформацию сердечника и тем самым колебания с основной частотой, равной частоте переменного тока. При этом обычно возникает и множество гармоник, наиболее выражена из них — вторая. Поэтому при частоте переменного тока 50 Гц шум трансформатора в основном сосредоточен на частоте 100 Гц; следует учитывать также резонанс в корпусе, заполненном маслом, и эффективность излучения звука всем агрегатом в целом.

Теперь поговорим об ударах и соударениях тел. Хотя удары служат весьма эффективными исходными возмущениями, сами по себе они создают не так уж много шума. Если бы оркестровые тарелки изготавливали не из меди, а из пластмассы, то удар палочки по ним звучал бы очень тихо. Удар кулаком по каменной стене почти не производит шума. Если же ударить кулаком по стенке жестяного картотечного шкафа, шум будет гораздо громче, но только благодаря большей эффективности усиления и излучения.

Ударами сопровождается работа многих механизмов. Особенно сильные удары производят прессы, пробойники и штамповочные машины. В пневматических перфораторах конец зубила ударяет по поверхности дорожного покрытия. Зубья и резцы пил, токарных и фрезерных станков с большой скоростью ударяют по обрабатываемому материалу. В сложных механизмах клапанные коромысла стучат о клапаны, зубчатые колеса — одно о другое, звездочки — о звенья цепи и т. д.

Однако многие из этих исходных возмущений сами по себе производили бы лишь самый незначительный шум. Мало проку было бы от нашей блок-флейты, не будь ее корпус резонатором; колебания скрипичной струны были бы еле слышны в отсутствие деки; пластмассовая оркестровая тарелка оказалась бы вообще бесполезной. Почему? Это происходит по двум причинам. Во-первых, исходные возмущения в блок-флейте беспорядочны, а беспорядочный шум по своей природе не слишком эффективен. Возникшие вихри «толкуются» без согласованного взаимодействия, и в результате увеличение давления, созданное одним вихрем, часто нейтрализуется за счет падения давления, вызванного другим. Колеблющаяся струна излучает слабый звук, поскольку, как мы уже видели, окружающий ее воздух не сжимается и не разрежается, а просто обтекает ее. А деформация пластмассовой тарелки, обусловленная ударом, затухает слишком быстро, чтобы вызывать заметный шум.

Усиление и излучение звука — существенные этапы в создании шума. В блок-флейте резонансные явления в корпусе создают обратную связь, которая существенно упорядочивает образование вихрей. Так как вихри образуются в том же темпе, в котором колеблется воздушный столб, они действуют согласованно, увеличивая эффект, а не противодействуют друг другу беспорядочно. Для создания звука резонанс струны не менее важен, чем резонанс воздуха в корпусе блок-флейты. Действительно, если нам, например, вздумается водить смычком по краю стола, резонанса не возникает и получается звук, который вряд ли кому-либо сможет доставить удовольствие. Еще важнее вопрос об эффективности излучения: ведь сама по себе струна почти не излучает звука, ибо воздух ее обтекает. В скрипке, однако, колебания струны действуют с переменными силами на подставку, через которую они передаются на деревянный корпус инструмента. Размеры корпуса настолько велики, что перетекание воздуха вокруг него происходит значительно слабее, чем вокруг струны. Разумеется, перетекание зависит и от частоты; чем больше поверхность, тем ниже частота, которую эта поверхность может эффективно излучать, и тем больше интенсив-

ность излучаемых звуков. Все, кто занимался системами высококачественного воспроизведения звука, знают, что для передачи низкочастотных звуков необходим громкоговоритель больших размеров. Если громкоговоритель заключить в ящик, то перетекание воздуха уменьшается; подобный способ применяется в бас-громкоговорителях.

Поскольку каждую точку колеблющейся поверхности можно рассматривать как самостоятельный источник шума, поверхность двойной площади излучает шум двойной интенсивности, то есть по уровню на 3 дБ выше. Это справедливо при условии, что амплитуды колебания обеих поверхностей в среднем одинаковы. Шум зубила на точильном колесе зависит от эффективности излучения звука как колесом, так и зубилом. Если какое-либо из этих тел способно совершать резонансные колебания значительной амплитуды — а это, безусловно, так, — то исходное возмущение, возникающее в точке касания зубила и колеса, возбudit эти резонансные колебания и звуковая энергия будет излучаться эффективно. К этому добавится также небольшой аэродинамический шум, обусловленный движением воздуха в неровностях поверхности точильного колеса, возмущаемого острием зубила. Чем больше колесо, тем выше интенсивность шума и тем более низкочастотным он окажется. Колесо больших размеров характеризуется не только более низкими резонансными частотами, но и большей способностью к излучению низкочастотных звуков. Напротив, зубило, обладающее малыми размерами, резонирует на высоких частотах и эффективно излучает только высокочастотные звуки.

Хотя резонанс очень эффективно усиливает звук, он не меняет излучающих свойств поверхности. Скрипичный мастер должен так рассчитать корпус скрипки, чтобы его резонансная частота была меньше низшей частоты баса. Поверхности, не имеющие резонансов, — «мертвые» поверхности — посредством исходного возмущения все же можно привести в состояние колебания, и тогда при их большой излучающей поверхности они могут существенно увеличить шум.

При наличии резонансов их значение чрезвычайно зависит от того, насколько вынуждающая частота

исходного возмущения близка к резонансной частоте. Если эти частоты совпадают, возможно значительное усиление шума.

Когда исходные возмущения обусловлены силами, возникающими при вращении неуравновешенных частей механизма, очень часто усиление и излучение звука осуществляет настил, на котором установлен механизм. Обычно это большая поверхность, которая может эффективно излучать звук, в частности низкочастотный. Кроме того, механизмы обычно имеют металлический кожух, обладающий, пожалуй, не меньшим числом резонансов, чем оркестровая тарелка, и, хотя резонансные частоты обычно лежат выше основной частоты колебаний механизма и поэтому их вклад в шум на этой частоте невелик, на более высоких частотах шум значительно увеличится.

Как мы уже знаем, в ударных источниках звука главную роль играют механизмы усиления и излучения. Если ударяемый предмет не резонирует, то возникающий шум — это просто результат мгновенного вытеснения воздуха между соударяющимися предметом и колотушкой и еще двух-трех колебаний, которые длятся одну-две миллисекунды. Удар же по резонирующему предмету вызовет его возбуждение, и тогда колебания продлятся по крайней мере секунду или дольше, в зависимости от величины внутреннего трения или затухания, вследствие которых звуковая энергия поглощается.

При работе штамповочного пресса резонирует и металл, из которого сделан пресс, и обрабатываемый металл, а часто еще пол под прессом. Когда работает циркулярная пила, удары между зубьями и обрабатываемым материалом, а также аэродинамический шум, создаваемый взаимодействием ротора и неподвижных элементов, возбуждают вынужденные резонансные колебания в диске пилы, который, вообще говоря, очень похож на оркестровую тарелку. Практически всегда, когда удар вызывает достаточно громкий шум, это значит, что где-то имел место резонанс. Если ударить ладонью по стене, воздушное пространство, остающееся между незначительным углублением ладони и стеной, ведет себя как резонатор Гельм-

гольца. О таких резонаторах, состоящих в близком родстве с резонирующими трубами, мы расскажем в гл. 8.

Теперь обратимся к некоторым важнейшим источникам шума и рассмотрим подробно, насколько применимы к ним вышеизложенные соображения. Почему шумят двигатели? Почему дизели производят больше шума, чем бензодвигатели? Почему самолеты визжат, идя на посадку, и ревут при взлете? Что составляет все эти машины шуметь так сильно?

Один из наиболее распространенных источников шума не только в городах, но и в сельских местностях — двигатель внутреннего сгорания. Генри Форд вряд ли представлял, что его автомобиль станет предтечей одного из главных нарушителей покоя в нынешние времена. Возможно, не будь двигателя внутреннего сгорания, экономика промышленных стран так и оставалась бы в младенческом состоянии, но с быстрым ростом городских автострад и непрерывным увеличением размеров и мощности двигателей шум и выхлопные газы стали одной из серьезнейших причин загрязнения окружающей среды в городах.

Легковые автомобили повинны в этом меньше, чем оснащенный дизельными моторами грузовой транспорт. Когда в последнем десятилетии XIX века Рудольф Дизель разработал «дизельный цикл», он, не подозревая этого, изобрел самый шумный двигатель внутреннего сгорания из всех известных до тех пор. Дизельный двигатель получил такое широкое признание, потому что он преобразует в работу большую долю данного количества тепла, чем любой другой. Несмотря на большую исходную стоимость, дополнительный вес и пониженную мощность при том же рабочем объеме, дизель оказался значительно экономичнее при длительной эксплуатации, чем бензиновые двигатели, и, конечно, он будет широко применяться еще многие годы. День, когда его заменят газовые турбины, электрические машины или ядерные двигатели, настанет очень не скоро. Поэтому ознакомимся подробнее с причинами шума, производимого двигателями внутреннего сгорания вообще и дизелем в частности.

Двигатель внутреннего сгорания можно рассматривать как средство преобразования шума в механическую энергию — это звучит весьма странно, но так оно и есть. А так как машин с к. п. д., равным 100%, не существует, то не удивительно, что наша шумовая машина выпускает некоторое количество звуковой энергии в окружающее пространство. Вся работа в поршневом двигателе внутреннего сгорания осуществляется в камерах сгорания. Газы, расширяясь, давят на дно поршня, и работа давления через шатуны и коленчатый вал преобразуется в энергию вращения. Если для одного оборота вала измерить зависимость давления в камере сгорания обычного дизельного двигателя от времени и результаты измерений нанести на график, то получится кривая, изображенная на рис. 23, соответствующая двигателю, работающему с полной нагрузкой и постоянным числом оборотов 2000 об/мин. Важно, что эта кривая давления периодически повторяется; значит, зависимость давления от времени можно разложить в ряд Фурье, то есть на сумму гармоник, подобно тому, как мы разлагали на гармоники звуки музыкальных инструментов (см. гл. 3), но только с более сложными зависимостями между ними. Результат анализа по методу Фурье давления в цилиндре и шума снаружи двигателя показан на рис. 24. Этот рисунок не дает фазовых зависимостей между составляющими, но они нас и не интересуют.

Теперь уже нетрудно понять, почему дизель — машина не только тепловая, но и шумовая. В камере

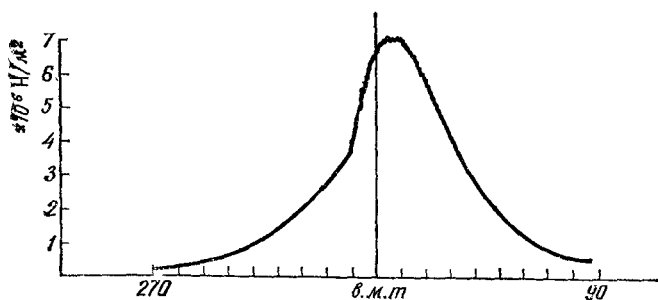


Рис. 23. Осциллограмма давления в цилиндре дизеля (в. м. т. — верхняя мертвая точка).

сгорания генерация шума происходит таким образом, что пульсация давления при посредстве поршня может повернуть коленчатый вал. Как и следует ожидать, уровень звукового давления в камере сгорания огромен, фактически он превышает 220 дБ относительно нулевого уровня 2×10^{-5} Н/м². Если бы все это давление вышло из цилиндра наружу в виде шума, никакой энергии бы не осталось, но, к счастью, большая часть энергии остается внутри двигателя и совершает полезную работу. Колебания давления на наружной поверхности двигателя едва составляют 0,001% от величины колебаний внутри камеры сгорания, а на расстоянии 1 м от двигателя звуковое давление падает еще на 10%.

Почему не вся энергия высвобождается в виде шума? Почему все же часть ее высвобождается? На

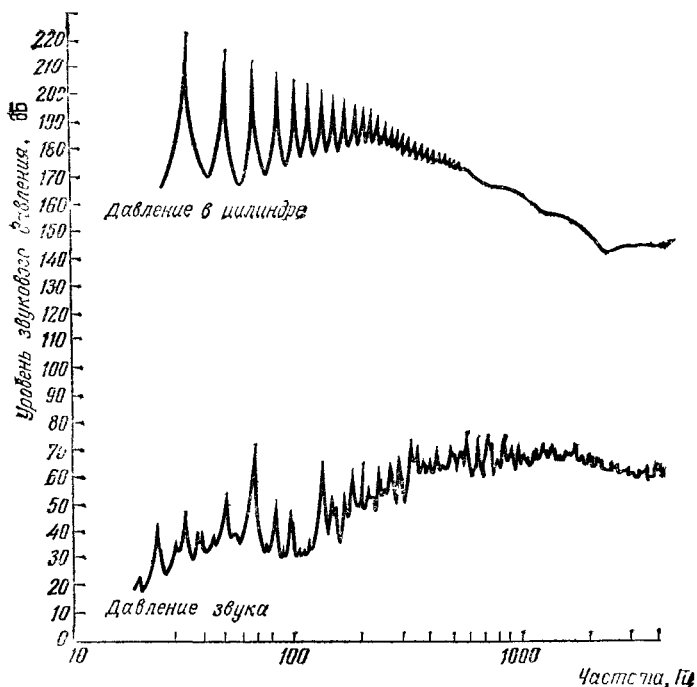


Рис. 24. Узкополосные спектры давления в цилиндре и шума снаружи цилиндра.

оба эти вопроса можно ответить одновременно. Если на время забыть о выхлопных и впускных отверстиях, то видно, что шум не может выйти наружу из камеры сгорания, не войдя предварительно в металл цилиндрического блока и картера, отливаемых обычно из чугуна. Шум не только должен проникнуть в металл, но и выйти оттуда в наружный воздух. В гл. 9 мы увидим, что в акустике, как и во многих других областях физики, одним из важнейших условий эффективного перехода энергии из одной среды в другую является малая разница в сопротивлении этих сред. Акустическое сопротивление (чаще называемое акустическим импедансом) чугуна примерно в 60 000 раз больше, чем для воздуха. Поэтому только незначительное количество звуковой энергии переходит из воздуха в чугун, а затем из него в воздух. Шум преимущественно остается в камере сгорания, а значительная часть звука, все же проникшего в чугун, так и не выходит наружу.

К сожалению, чугунный цилиндрический блок частично «преодолеывает» это препятствие. Если цилиндрический блок с картером испытать в лаборатории на вибрацию, обнаружится, что он обладает множеством резонансов на разных частотах. Изгибные волны, возникающие в металле, отражаются от всех участков блока, где его форма и толщина резко изменяются, создавая во всей конструкции стоячие волны различной пространственной формы и различных частот. Разумеется, все эти волны имеют гармоники. Явление же резонанса в конструкции значительно снижает ее акустический импеданс для звука резонансной частоты.

Когда фурье-составляющая шума, производимого в камере сгорания, совпадает с какой-либо из резонансных частот блока цилиндра, наружу вырывается значительно большая доля звуковой энергии. Возвращаясь к рис. 24, видим, что именно это и происходит в описанном двигателе при частотах, соответствующих третьей и седьмой гармоникам. Первая, вторая, четвертая и все остальные гармоники, очевидно, хуже «настроены» на резонансные частоты цилиндрического блока и не так легко проходят сквозь него. Все сказанное справедливо для постоянной скорости враще-

ния в 2000 об/мин; при изменении числа оборотов изменится и вся картина.

Цилиндровый блок и картер отнюдь не единственные излучатели звука в двигателе. Колебания передаются также к корпусу распределителя зажигания и к крышкам клапанов, которые обычно резонируют сильнее, чем чугунные детали. Большие силы передаются также через поршни в коленчатый вал, так что шкив вала, как и маховик, становится излучателем звука, хотя маховик обычно находится внутри картера сцепления.

Теперь мы уже в состоянии понять, почему дизельный двигатель шумит совсем иначе и много громче, чем бензиновый. Прежде всего, когда бензиновый двигатель работает с небольшой нагрузкой или совсем без нее, всасывание задресселировано и рост давления в камере сгорания резко снижается, что значительно уменьшает амплитуду составляющих Фурье. В дизеле же при снижении и полном снятии нагрузки никакого дросселирования не производят, а уменьшают лишь количество горючего, впрыскиваемого в камеру сгорания, так что давление в цилиндре снижается незначительно.

Еще существеннее то обстоятельство, что в бензиновом двигателе распространение пламени от запальной свечи до стенок камеры сгорания происходит сравнительно медленно, в результате чего кривая возрастания давления имеет достаточно плавный ход. Совершенно иначе обстоит дело с дизелем: наружный воздух всасывается в камеру сгорания, сжимается, а затем отмеренная порция горючего впрыскивается в камеру. Температура воздуха поднимается вследствие сжатия намного выше температуры воспламенения жидкого топлива. Практически все топливо вспыхивает одновременно, и в этот момент на кривой давления отмечается внезапный, резкий скачок давления. При разложении кривых роста давления в дизельном и бензиновом двигателях в ряд Фурье обнаруживается, что дизелю свойственны высокие гармонки гораздо большей интенсивности, что и объясняет характерный стук при работе дизеля. Из различия в рядах Фурье следует также, что нарастание шума с увеличением скорости у бензинового двигателя больше,

чем у дизеля. Десятикратное увеличение скорости бензинового двигателя дает усиление шума на 50 дБ, тогда как у дизеля — всего лишь на 30 дБ. Если бы удалось достигнуть достаточной скорости вращения у бензинового и аналогичного дизельного двигателя, то при некотором числе оборотов оба двигателя создавали бы один и тот же уровень шума.

Заметим, что десятикратное увеличение объема двигателя увеличивает уровень шума всего на 17 дБ. Отсюда следует, что, применяя тихходные двигатели, при соответствующем увеличении их объема мы уменьшим шум. Быстроходный небольшой двигатель, по существу, всегда производит больше шума, чем медленно работающий двигатель той же мощности. Если к тому же учесть, что при медленном вращении двигатель создает низкочастотные звуки, относящиеся к той части звукового спектра, к которой наш слух менее чувствителен, то уменьшение шума будет еще существеннее.

В двигателе есть и другие источники шума; одни из них не зависят от сгорания топлива, другие связаны с ним. Каждый раз, когда открывается выхлопной клапан, происходит мгновенное высвобождение и перетекание сжатого газа в газопровод. Пульсации газа в газопроводе в течение каждого оборота двигателя, как и кривую давления в камере сгорания, можно разложить на гармонические составляющие. Трубопровод и выхлопная труба обладают собственными резонансами и гармониками, и, если их частоты совпадают с частотами выхлопа, шум усиливается. К счастью, в большинстве случаев двигатели снабжены достаточно эффективными глушителями выхлопа, устройство которых мы рассмотрим ниже. И если звук выхлопа сравнительно силен, это значит только, что из экономии применен глушитель плохого качества; технически всегда возможно снизить выхлопной шум до уровня, меньшего, чем уровень шума самого двигателя. Борьба же с шумом самого двигателя — наиболее трудная задача.

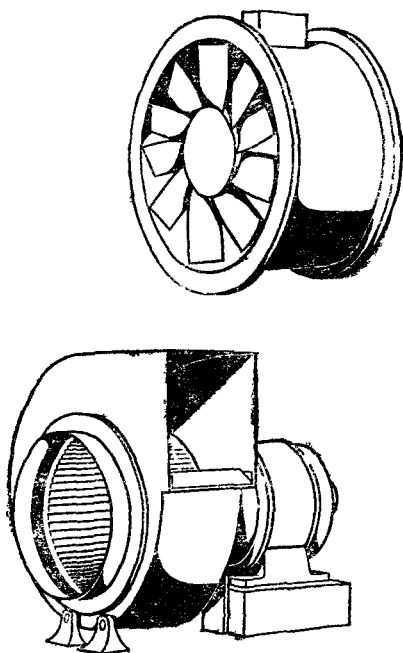
Следует также считаться и с шумом впуска, который часто ускользает от внимания конструкторов двигателей. Когда впускной клапан открывается, давление в цилиндре еще несколько повышено, и газ уст-

ремляется во впускной трубопровод. Почти немедленно происходит обратное движение, и газ всасывается в цилиндр. Часто шум впуска оказывается меньше шума резонансов впускного газопровода, возбуждаемых колебаниями газа во впускном окне.

В бензиновых двигателях, работающих без нагрузки, шумы выхлопа и впуска значительно ослабляются, для дизеля же нагрузка не имеет особого значения. В бензиновом двигателе шум выхлопа усиливается при торможении, например когда автомобиль идет под гору и мотор вращается с прикрытым дросселем. Определенную роль в дизельных и некоторых бензиновых двигателях играют топливные форсунки. Их шум обычно слабее шума двигателя. Цепь к распределительному валу, клапанная передача и коробка передач — все вносит свой вклад в суммарный шум.

В этом «оркестре», спрятанном под капотом автомобиля, есть еще один инструмент, партия которого звучит гораздо громче, чем обычно думают, — это вентилятор системы охлаждения мотора. Шум вообще исконное свойство вентиляторов, и они заслуживают особого места в перечне механизмов, описываемых в этой главе. При некоторых скоростях двигателя легковых автомашин шум вентилятора становится таким же громким, как и шум самого мотора. При десятикратном увеличении числа оборотов мотора шум вентилятора возрастает на 50—60 дБ и становится громче шума мотора; кроме того, вентилятор начинает снижать полезную мощность мотора, вызывая его перегревание. Замена обычного вентилятора устройством с термостатической регулировкой и электрическим приводом или электромагнитной муфтой не только снизит шум двигателя, но и сэкономит некоторое количество полезной мощности при высоких оборотах мотора. К сожалению, экономия горючего незначительна по сравнению со стоимостью таких устройств, но все же два-три лишних километра в час или два-три лишних километра на галлон горючего, а также снижение шума должны привлечь внимание к этим устройствам.

Хотя вентиляторы, конечно, не основные виновники шума, следует остановиться на них уже сейчас, ибо,



Р и с. 25. Осевой вентилятор (вверху) и центробежный вентилятор (внизу).

когда мы дойдем до акустического чудовища — реактивного двигателя, выяснится, что между ними есть много общего. К тому же в числе устройств для вентиляции и кондиционирования воздуха это самые шумные механизмы.

Вентилятор — это устройство для перемещения воздуха. Существуют два типа вентиляторов — осевые и центробежные. На рис. 25 показаны типичные представители тех и других. У осевого вентилятора много общего с авиационным пропеллером, и поэтому осевые вентиляторы, работающие при незначительном статическом давлении или практически в его отсутствие (что допускает применение корпуса простейшего типа), обычно называют пропеллерными. Центробежный вентилятор приводит воздух в круговое движение, и центробежная сила создает радиальный поток

воздуха, направляемый улиткой в выходную трубу, расположенную под прямым углом к валу вентилятора. Лопасти этих вентиляторов могут быть искривлены вперед, назад или расположены радиально, от чего зависят рабочие характеристики. В вентиляторах любого типа механизмы образования шума одинаковы; создаются шумы двух видов, а именно вихревой шум и шум вращения. Мы уже встречались с ними в начале этой главы.

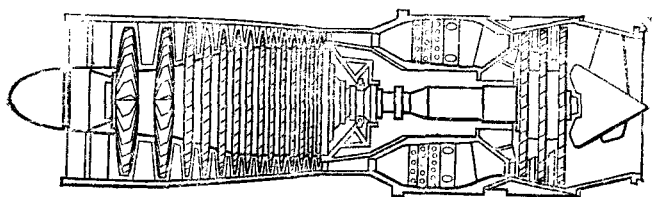
Образование вихрей создает широкополосный шум, лишенный дискретных составляющих; он как бы служит «аккомпанементом» другому виду шума вентилятора — шуму вращения. Выберем в воздухе какую-нибудь точку вблизи траектории лопастей; при каждом прохождении лопасти мимо этой точки воздух в ней получит дополнительный толчок, создающий внезапный импульс давления. У большинства вентиляторов частота звука прохождения лопастей лежит в пределах слышимости; график пульсации давления в любой точке воздушной среды — периодическая кривая. И как всякую периодическую кривую, ее можно разложить в ряд Фурье, то есть представить в виде суммы гармонических составляющих. Основная частота равна частоте прохождения лопастей вентилятора, но, помимо нее, в шуме будет присутствовать множество высших гармоник.

Шум вращения увеличивается, когда лопасти проходят мимо неподвижных тел, например направляющих лопаток или станины мотора в осевом вентиляторе или языка — в центробежном. При прохождении лопасти воздух оказывается внезапно «зажатым», что еще более усиливает шум вращения. Это явление обусловлено зазорами между вращающимися и неподвижными элементами и имеет место не только в вентиляторах, но и во всех вращающихся механизмах, в частности турбинах и электромоторах. Что касается направляющих лопаток в осевых вентиляторах, то, если их число равно числу лопастей, шум прохождения лопастей значительно усиливается; если число тех и других различно, общее усиление шума меньше. Если, как это часто случается, какая-нибудь часть вентилятора, например крепление или корпус, приходит в резонансные колебания, шум вихрей и шум

вращения существенно возрастает. Еще хуже, когда возникает резонанс самих лопастей: если, по несчастной случайности, резонансная частота или ее гармоника для лопасти или направляющей лопатки совпадут с частотой звука прохождения лопастей или ее гармоникой, то обе причины начнут действовать совместно и произойдет дальнейшее усиление шума. У некоторых пропеллерных вентиляторов лопастями служат широкие, почти плоские штамповки из листовой стали, и, разумеется, они резонируют сильнее, чем другие. В настоящее время лопасти для осевых вентиляторов зачастую изготавливают из термопластика или других подобных материалов, характеризующихся большими внутренними потерями, и поэтому резонансы в них незначительны. С акустическими свойствами различных материалов мы ознакомимся в гл. 12.

Шум вентилятора можно с достаточной точностью рассчитать теоретически. Общий уровень излучаемой вентилятором звуковой энергии определяется его производительностью, статическим давлением и потребляемой мощностью. Достаточно знать два из этих факторов. Если нам известен уровень шума какого-либо вентилятора, мы можем составить представление и о частотном распределении шума, будь то осевой или центробежный вентилятор. У последнего основная часть шума лежит в низкочастотной области в октавной полосе 63 Гц, а в более высоких полосах шум прогрессивно убывает. В среднем в каждой последующей октавной полосе уровень шума уменьшается на 5 дБ; однако у некоторых вентиляторов, в частности у вентиляторов с загнутыми назад лопастями, звуковая энергия в основном сосредоточена вблизи частоты прохождения лопастей.

У осевых вентиляторов шум вращения также весьма заметен, но обилие гармоник приводит к довольно равномерному звуковому спектру, на низкочастотном и высокочастотном концах которого уровень шума понижается на несколько дБ. Эти вентиляторы легче заглушить, чем центробежные, потому что в их шуме гораздо меньше низкочастотных составляющих, которые зачастую почти не поддаются ослаблению; однако, когда вентилятор присоединен к трубопроводу, внутренние потери в трубах обычно заметно снижают



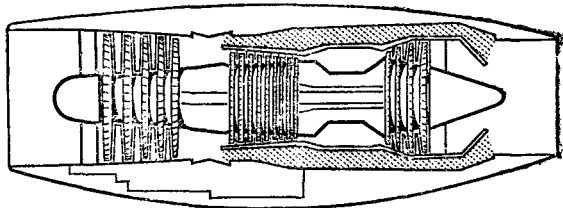
Р и с. 26. Турбореактивный двигатель.

шум центробежных вентиляторов, но почти не оказывают влияния на шум осевых вентиляторов. Шум осевых вентиляторов гораздо неприятнее, потому что содержит много чистых тонов, тогда как остаточный шум центробежного вентилятора состоит только из вихревого шума и вызывает значительно меньше неприятных ощущений.

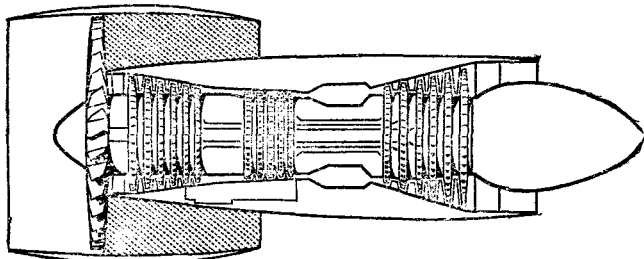
Ну, а теперь обратимся к реактивному двигателю — из всех машин, загрязняющих шумом окружающую среду, он имеет наихудшую репутацию. Проносящийся над головой реактивный самолет создает самый сильный шум из тех, какие доводится слышать современному человеку в обычных условиях. Возможно, этот шум причиняет больше беспокойства большему числу людей, чем любой другой, даже чем шум наземного транспорта — его главный соперник. Проблема шума реактивных самолетов получила такое значение, что реактивные двигатели пользуются уникальной привилегией: в перечне требований, предъявляемых проектировщикам, устранение шума занимает одно из первых мест. Каким бы дешевым, эффективным, легким и экономичным ни был данный реактивный двигатель, его не установят ни на одном гражданском самолете, если он окажется слишком шумным!

Читатель, возможно, воскликнет: «Все реактивные двигатели шумят слишком сильно!» Но все на свете относительно, и было бы несправедливо игнорировать заметные достижения некоторых конструкторов в борьбе за уменьшение шума реактивных двигателей. Прежде чем продолжать, нам следует вспомнить, что ближайшие родичи реактивных моторов — газовые турбины — широко применяются в качестве стационарных и судовых двигателей, а также на самых

Средняя степень двухконтурности



Большая степень двухконтурности



Р и с. 27. Турбовентиляторные двигатели.

современных электростанциях. Сейчас пытаются использовать их и как автомобильные двигатели. А ведь только благодаря искусству инженеров-акустиков население защищено от шума этих машин; правда, перед этими специалистами не стояла проблема установки глушителей на самолет.

Второй закон Ньютона утверждает: каждому действию соответствует равное и обратное направленное противодействие. Как ракетный, так и реактивный двигатели целиком опираются на этот закон. Ракетный двигатель несет с собой и жидкое горючее, и окислитель. При сгорании горючего в камере сгорания выделяется огромное количество тепла и образуются большие объемы газа. Газ расширяется с большой скоростью и выходит из камеры сгорания наружу через единственный выход: сопло в хвостовой части ракеты. В результате значительная масса газа непрерывно выбрасывается с ускорением из хвостовой части ракеты, что можно сравнить с непрерывным потоком пуль, выстреливаемых из ружья. Каждый, кто стрелял из ружья, знаком с явлением действия и про-

тиводействия при отдаче ружья, приводящим к болезненному удару в плечо после каждого выстрела. Если бы ружье стреляло непрерывно, удар превратился бы в постоянную силу, действующую на плечо стреляющего. Эта сила и есть в чистом виде сила противодействия, или реакция на действие выталкивания пули. Подобным же образом при выталкивании массы выхлопного газа из ракетного двигателя создается реактивная сила, и именно эта реакция сообщает движение ракете.

Реактивный двигатель, в сущности, тот же ракетный двигатель, но несущий с собой не весь запас необходимого газа, а использующий окружающий газ, то есть воздух. У простого турбореактивного двигателя, как и у ракетного, имеются камеры сгорания и выхлопное сопло, через которое газы вырываются с ускорением, создавая реактивную тягу. Горячий газ образуется так же, как и в камере сгорания поршневого двигателя: к воздуху под давлением добавляется распыленное горючее и смесь зажигается. Но в турбореактивном двигателе этот процесс происходит непрерывно; для сжатия воздуха применяется компрессор — весьма сложный многолопастный, многоступенчатый осевой вентилятор с последовательно расположенными ступенями; горючее впрыскивается в камеру непрерывно, поступая в нее одновременно со сжатым воздухом, так что после запуска двигателя зажигание осуществляется самопроизвольно и непрерывно. Для приведения в действие компрессора позади камеры сгорания устанавливается газовая турбина, которая отбирает часть энергии расширяющихся газов для вращения компрессора. Турбина похожа на обращенный вентилятор или на ветряную мельницу хитроумной конструкции; сидя на том же валу, что и компрессор, она вращает его.

Шум турбореактивного двигателя имеет несколько источников. Наибольший шум создает турбулентное перемешивание скоростной струи газа с окружающим атмосферным воздухом. Снова на сцене вихри — наши старые знакомые, и теперь мы достаточно освоились с ними, чтобы понять, каким образом струя газа производит шум. Интересно, что, создавая с помощью специального устройства поток холодного воздуха, во

всех отношениях, кроме температуры, подобный струе турбореактивного двигателя, мы услышим почти такой же шум. Источники звука расположены не в сопле, а несколько ниже по течению газа, в так называемой «зоне смещения», где скоростная турбулентная струя смешивается с атмосферным воздухом. Можно было бы предположить, что стационарный турбореактивный двигатель должен производить больше шума, чем движущийся, ввиду большей скорости газового потока относительно окружающего воздуха. До известной степени это верно; однако в действительности все обстоит гораздо сложнее, и может оказаться, что во втором случае высокочастотный шум больше.

Выходящая из сопла струя излучает шум в разных направлениях с различной интенсивностью. Львиная доля шума идет назад и диаграмма направленности имеет сердцевидную форму: наибольший уровень шума наблюдается позади двигателя приблизительно под углом 40° к его оси.

На втором месте в создании шума турбореактивного двигателя стоит компрессор. Первая ступень в обычном двигателе — это венец направляющих лопаток, затем следует первая вращающаяся ступень, потом — снова чередующиеся ступени лопаток статоров и роторов. Число тех и других ступеней может доходить до пятнадцати. Взаимодействие роторов и статоров создает шум высокой частоты, сходный со звуком сирены, который, как обычно, сопровождается гармониками и излучается вперед. Это и есть тот свист, который самолет издает при посадке. Если лопасти компрессора изготовлены из обычных металлов, в них возникают резонансы, которые увеличивают шум. И, как всегда, если резонансные частоты или гармоники лопастей совпадают с частотой взаимодействия ротор — статор, шум усиливается.

Газовая турбина тоже визжит, но ее шум излучается назад и обычно перекрывается шумом струи.

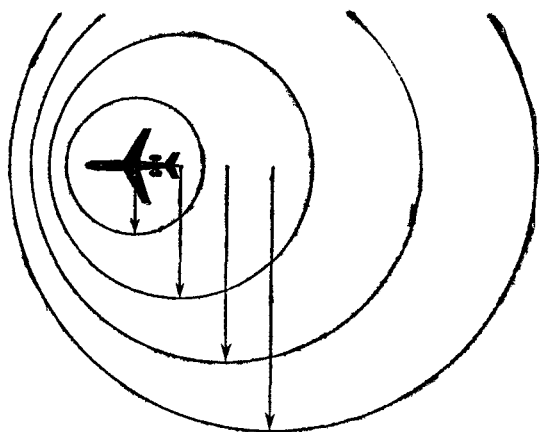
Корпус — еще один излучатель шума в реактивном двигателе. Шумы, идущие изнутри, а именно шумы сгорания, шумы турбины и компрессора, проникают в корпус и вызывают его колебания, последние в свою очередь излучают шум. Но по сравнению с шумом истечения струи шум корпуса очень слаб.

В настоящее время конструкции реактивных двигателей значительно усовершенствованы, и работа в этом направлении продолжается, а первоначальные модели турбореактивных двигателей уходят в прошлое. Оказалось возможным снизить излучение источников шума этих двигателей; в новых турбовентиляторных двигателях уменьшена скорость струи газа и усовершенствован процесс смешения. В них первая ступень компрессора имеет большие размеры, и воздух обдувает корпус двигателя («двухконтурность», см. гл. 12).

Не так давно, однако, мы все смогли убедиться, что самолетные двигатели отнюдь не единственная причина шумового загрязнения среды. И действительно, совершенно «бесшумный» самолет может создать сложнейшую проблему шума, если он полетит со сверхзвуковой скоростью. «Звуковой хлопок» — новый тип шума, по сравнению с которым остальные кажутся незначительными, и он создает проблемы государственного масштаба. Что же такое «звуковой хлопок?» Когда военные самолеты впервые полетели со сверхзвуковыми скоростями, создатели многих кинофильмов того времени старались запечатлеть «преодоление звукового барьера». Летчики в защитных очках выдвигали вперед челюсть, скрежетали зубами, экран сотрясался, и капли пота сбегали у них со лба, когда, подобно Армагедону, приближался кульминационный душераздирающий момент и они прорывались сквозь звуковой барьер. Впрочем, специалисты мне объяснили, что можно достичь числа Маха, равного 1, ничего при этом не заметив...

На самом деле от звукового хлопка страдают люди, оставшиеся на земле. Когда твердое тело движется в воздухе, непосредственно впереди этого тела возникает повышенное давление. При скорости тела, меньшей скорости звука, это давление остается малым и только дает начало звуковым волнам, отходящим от тела (рис. 28). Но если скорость тела относительно окружающего воздуха больше скорости звука, звуковые волны не успевают отходить от тела и давление накапливается впереди тела, образуя скачок уплотнения (ударная волна) конической формы. Конус расширяется, и ударная волна в конце концов достигает

*Дозвуковая
скорость*



*Сверхзвуковая
скорость*

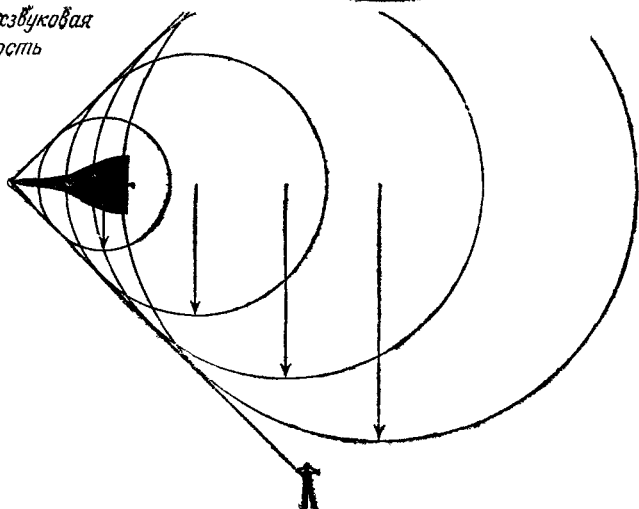
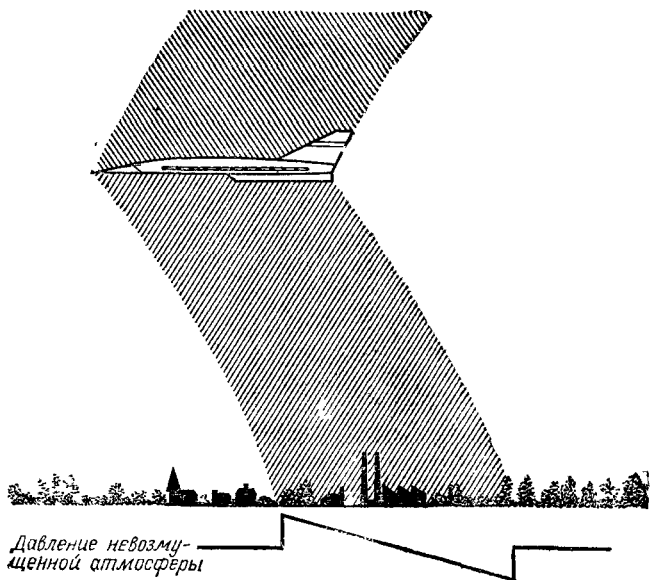


Рис. 28. Волны давления в воздухе при дозвуковой и сверхзвуковой скоростях движения.

земли, где воспринимается как звук хлопка или гул выстрела. Вопреки весьма распространенным представлениям звуковой хлопок возникает по следу самолета на протяжении всего времени, пока он летит со сверхзвуковой скоростью, а не только в момент «преодоления звукового барьера». Так как с увеличением высоты температура воздуха понижается во всей тропосфере, температурный градиент вызывает изгиб



Р и с. 29. Звуковой хлопок.

пути ударной волны кверху (гл. 7) и поэтому она не всегда достигает земли. Чтобы ударная волна значительной величины дошла до земли, число Маха у самолета, идущего на высоте 10 000 м, должно превышать 1,3. Ударные волны имеют N-образную форму (рис. 29); они возникают во всех точках, где форма самолета претерпевает изменения, например в местах соединения крыльев с корпусом, у обтекателей мотора, у стабилизаторов и рулей, но все эти второстепенные волны сливаются по мере распространения, так что до земли доходят только два основных удара — от носа и от хвоста, что и придает ударной волне N-образную форму. Вот почему мы слышим звуковой хлопок как два быстро следующих друг за другом удара.

С увеличением высоты полета интенсивность хлопка на земле уменьшается. Следует также иметь в виду, что на высотах, где летают сверхзвуковые самолеты, воздух заметно разрежен и это уменьшает амплитуду волны. Заостренная, подобно игле, форма носа сверхзвуковых самолетов, помимо всего прочего, способствует уменьшению волны давления впереди самолета.

От точки А к точке Б — звук в открытом пространстве

Мы уже много узнали о звуке и его источниках, познакомились также с устройством уха. Теперь же попытаемся выяснить, что случается со звуком после того, как он выходит из источника. Что происходит с ним на пути от источника к уху? Ответ на этот вопрос интереснее, чем обычно думают

Вернемся на минуту к нашему старому знакомому — пульсирующему баллону и представим, что он подвешен в воздухе где-то между небом и землей. В предыдущей главе мы сделали одно замечание, значение которого нам станет ясно только теперь: каждую точку поверхности, совершающей колебания, можно рассматривать как самостоятельный источник звука. Если мы пойдем назад еще дальше, к главе 2, мы прочтем там, что передача звуковой волны осуществляется молекулами (или частицами) среды, которые сжимают разделяющие их «пружинки», в результате чего те приобретают потенциальную энергию и передают ее следующим частицам, последние приходят в движение и приобретают кинетическую энергию и т. д. Однако в этом описании мы кое-что упустили из виду. В газовой среде давление никогда не бывает направлено только в одну сторону. Если давить вниз на поршень велосипедного насоса и проколоть камеру сбоку, то воздух будет выходить из бокового отверстия с такой же силой, как и из отверстия, сделанного снизу. Представим себе типичную, например, синусоидальную звуковую волну длиной около 200 мм и вычертим кривую давления вдоль направления ее распространения; окажется, что в любой момент времени участок, где среда сжата, составляет половину длины волны, то есть 100 мм, и вовсе не равен рас-

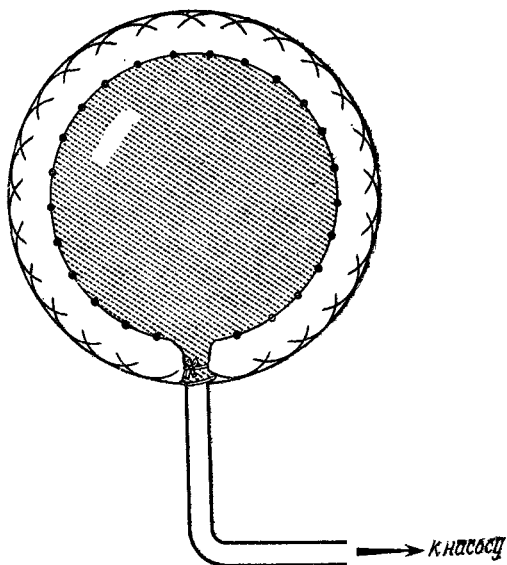


Рис. 30. Построение фронта волны методом Гюйгенса (для пульсирующего баллона).

стоянию между молекулами. Молекулы воздуха не выстраиваются в некий стройный ряд, где все связывающие их «пружинки» действовали бы строго в одном направлении: они расположены самым беспорядочным образом, так что межмолекулярные силы действуют во всех направлениях. Поэтому если бы удалось «заморозить» воздух, в котором распространяется звуковая волна, и прямо в середину участка сгущения ввести прибор для измерения давления, обладающий направленным действием, то, как бы мы ни поворачивали прибор во всех направлениях, его показание осталось бы неизменным.

Из этого следует, что каждую точку звукового излучателя можно рассматривать как самостоятельный источник звука, создающий переменное давление во всех направлениях. На рис. 30 показано несколько точек на поверхности пульсирующего баллона в момент его расширения. Каждая точка дает начало своей собственной полусферической звуковой волне. А так

как давление действует в волне во всех направлениях, то каждую точку фронта волны можно рассматривать как новый источник звука. Этот подход к построению волны известен как метод Гюйгенса.

Не будем спорить с тем, кто решит, что совместное действие мириадов этих крошечных гипотетических волн приведет лишь к какой-то каше из звуковых волн. Взглянув на рис. 30, мы обнаружим, что на самом деле все происходит очень упорядоченно. Как мы помним, если через данную точку проходят две или больше звуковых волн, их давления или интенсивности складываются (метод суперпозиции). Конечно, если все эти величины выражены в децибелах, следует пользоваться правилом сложения уровней. При сложении мелких полусферических волн, излучаемых отдельными точками поверхности пульсирующего баллона, получается новый фронт волны, также имеющий форму сферы, концентрической с баллоном. Более того, каждая точка этого нового фронта опять служит самостоятельным источником звука, и, в результате сложения этих новых вторичных волн, получится новая концентрическая сферическая волна. В рассматриваемом случае не было необходимости обращаться к методу Гюйгенса — вполне достаточно было сказать, что сферический баллон излучает сферические звуковые волны все возрастающего радиуса, бегущие со скоростью 344 м/с. Однако в более сложных случаях построение вторичных волн — единственный путь к пониманию многих особенностей поведения звука.

Поверхность сферической волны, излучаемой баллоном, увеличивается по мере удаления от баллона; соответственно интенсивность звука уменьшается. Каждому увеличению расстояния вдвое соответствует увеличение поверхности звуковой волны в 4 раза, что приводит к снижению интенсивности звука, а следовательно и уровня звукового давления, на 6 дБ. Другими словами, интенсивность звука обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника — это так называемый закон обратных квадратов.

Если источник с известным уровнем звуковой мощности излучает звук в виде сферически-симметричной волны с одинаковой интенсивностью во всех направ-

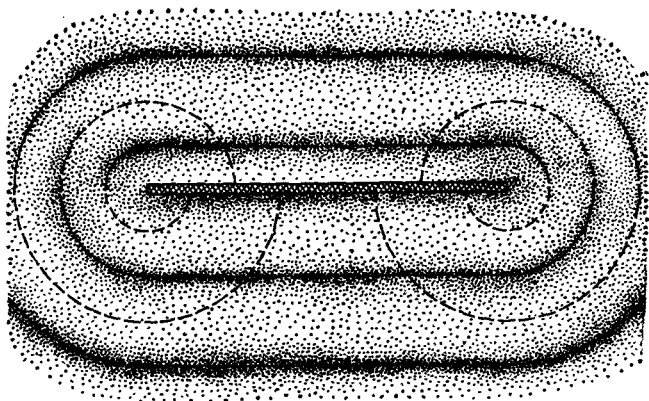


Рис. 31. Излучение звуковых волн колеблющейся стальной пластиной.

лениях, уровень звукового давления на любом расстоянии от источника легко вычислить. Интенсивность звука меняется по закону $1/r^2$, где r — расстояние от центра излучателя до данной точки. На расстоянии r от источника интенсивность звука равна мощности источника, умноженной на $1/4\pi r^2$. Переходя к децибелам, получим:

$$\begin{aligned} \text{Уровень звукового давления} &= \\ &= \text{Уровень мощности источника} + 10 \lg 1/4\pi r^2 \text{ (дБ)}. \end{aligned}$$

Однако на практике обычно не все так просто, потому что источники звука редко создают столь удобное для расчетов сферически-симметричное излучение. Забудем о пульсирующем баллоне и рассмотрим более сложный источник звука — колеблющуюся стальную пластинку. Здесь вышеописанный сложный метод построения волны становится полезным. Из рис. 31 видно, что вторичные сферические волны, излучаемые отдельными точками, взаимно уничтожаются по краям пластинки, так как волны на одной стороне пластинки отличны по фазе точно на 180° от волн на другой ее стороне. В середине пластины огибающая вторичных волн представляет собой не шаровую поверхность, а плоскость, то есть излучаемая волна — плоская.

Поэтому почти весь звук излучается в направлении, перпендикулярном пластине; закон обратных квадратов здесь неприменим.

По мере удаления от пластины, а также с увеличением длины-волны взаимное уничтожение волн по краям пластины становится менее полным. Поэтому на расстоянии нескольких метров от нее, в так называемой дальней зоне, форма волн снова приближается к сферической, а закон обратных квадратов опять входит в силу, однако лишь для каждого направления в отдельности, поскольку в разных направлениях интенсивность звука может быть различной. Зависимость доли излученной интенсивности от направления называют коэффициентом направленности Q_θ .

Для источников такой простой формы, как пластина, коэффициент направленности можно вычислить для любого угла θ , но в большинстве случаев его проще измерить. Если известны уровень мощности и коэффициент направленности, уровень звукового давления на расстоянии r (м) от источника звука в точке, лежащей на прямой, составляющей угол θ с осью источника, определяется по формуле

$$УЗД = УЗМ + 10 \lg(Q_\theta/4\pi r^2),$$

где УЗД — уровень звукового давления; УЗМ — уровень звуковой мощности источника. Рассчитать зависимость уровня давления от расстояния можно достаточно точно, особенно если точки лежат на одной прямой и нет необходимости знать направленность источника. Однако так обстоит дело только на открытом воздухе, когда поблизости нет крупных объектов, при отсутствии ветра и при температуре, не меняющейся с высотой. К сожалению, эти условия никогда не соблюдаются одновременно — в бочке меда непременно оказывается ложка дегтя.

Прежде всего вблизи источника всегда найдется какая-нибудь отражающая поверхность, хотя бы поверхность земли. Тогда распространяются две волны: прямая и отраженная, и если путь отраженной волны незначительно длиннее прямого, то амплитуды обеих звуковых волн могут оказаться почти равными и либо интенсивность, либо давление удвоится, что даст уве-

личение уровня на 3 или на 6 дБ соответственно¹. При многократном отражении уровень может возрасти еще сильнее. Однако иногда еще большее значение имеют ветер и изменение температуры с высотой. В атмосфере никогда не бывает ни полного безветрия, ни одинаковой температуры на всех высотах. Легко заметить, что против ветра слышимость ухудшается, независимо от того, маскирует ли ветер звуки, к которым мы прислушиваемся, или нет. Некоторые объясняют это тем, что ветер «относит звуки назад», однако это не так — разве только скорость ветра достигнет скорости звука; но тогда ветер унесет и самого наблюдателя!

Действие ветра на звук многосторонне, но прежде всего мы поговорим о сложении векторов скорости. На рис. 32 показан случай, когда звуковая волна бежит под небольшим углом к направлению ветра; результирующее направление распространения и скорость волны определяются по правилу параллелограмма. Другое действие ветра на распространение звука связано с тем, что скорость ветра у поверхности земли меньше, чем в более высоких слоях атмосферы. Поэтому при распространении звука против ветра результирующая скорость звука у поверхности земли больше, чем на высоте.

Прежде чем объяснить, к чему это приведет, рассмотрим роль температуры. В течение дня под действием теплового излучения солнца земля нагревается.

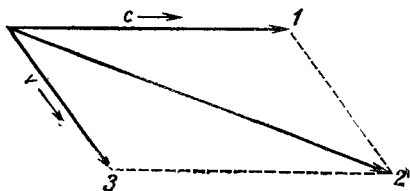


Рис. 32. Влияние ветра на направление распространения звуковой волны.

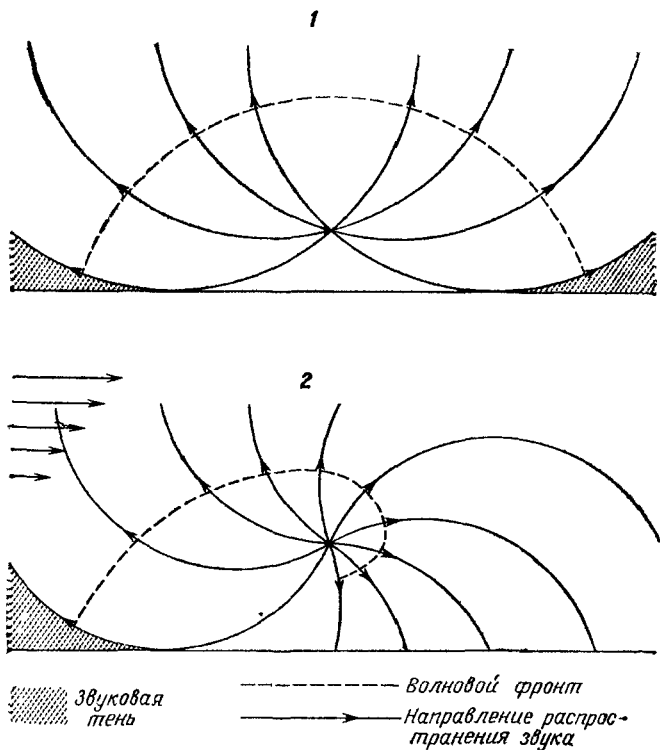
1—направление распространения звука в отсутствие ветра; 2—результантующее направление распространения звука; 3—направление ветра.

¹ При разности путей, равной половине длины волны, эти волны могут уничтожить друг друга: вместо усиления произойдет ослабление. — *Прим. ред.*

Она нагревает прилегающий к ней слой воздуха, затем в результате конвекции нагреваются, хотя и в меньшей степени, более высокие слои воздуха. Возникающий в тихий солнечный день отрицательный температурный градиент часто весьма значителен по величине. Ночью земля отдает тепло воздуху, но уже не получает его от солнца. Путем конвекции нагретый воздух перемещается на большие высоты, и в ясную, тихую ночь нередко наблюдается значительный положительный температурный градиент, или «температурная инверсия».

В теплом воздухе скорость звука больше, чем в холодном. При отрицательном температурном градиенте скорость звука уменьшается по мере удаления от поверхности земли. Аналогичное явление наблюдается, когда звук распространяется против ветра при положительном градиенте скорости ветра: в этом случае убывание скорости звука с высотой получается в результате вычитания из нее скорости встречного ветра.

Как это отражается на распространении звука? Это видно из рис. 33. На нем изображен фронт звуковой волны, бегущей при положительном градиенте скорости ветра и отрицательном температурном градиенте. В верхней части волновой фронт распространяется в более холодном воздухе или против более сильного ветра и поэтому движется с меньшей скоростью, чем в нижней части. В результате фронт волны изгибается кверху. Аналогично, если в лодке грести одним веслом сильнее, чем другим, то лодка поворачивает в сторону от него. На рис. 33 показан результирующий эффект. Если звуковая волна распространяется от источника против ветра или бежит в любом направлении в атмосфере при отрицательном температурном градиенте, ее путь искривляется кверху и земля оказывает экранирующее действие, сопровождаемое возникновением звуковой тени. Экранирование при этом не полное, так как вследствие дифракции звука волна проникает и в область тени — с этим явлением мы скоро познакомимся. Во всяком случае, за пределами критического расстояния между источником звука и точкой, где волна, проходящая ниже всех остальных, касается поверхности земли, ин-



Р и с. 33. Влияние убывания температуры с высотой и положительного градиента ветра на распространение звука.

1—температура убывает с увеличением высоты; 2—скорость ветра возрастает с увеличением высоты.

тенсивность звука значительно снижается. Это снижение особенно сильно выражено для высокочастотного звука, что также связано с явлением дифракции. Напротив, при распространении звука по ветру или в условиях температурной инверсии фронты волн изгибаются в обратном направлении, что приводит к прямо противоположным результатам.

Число переменных параметров в задаче распространения звука так велико, что теоретическая оценка влияния градиентов ненадежна; чтобы дать представление о порядке величин, укажем, что при частоте

звук 1 кГц и распространении его против ветра, дующего со скоростью 20 км/ч, интенсивность звука на расстоянии 1 км от источника снизится примерно на 30 дБ. Турбулентность ветра вызывает рассеяние звуковых волн и отклонение их в область тени, а также снижает интенсивность проходящих волн.

На распространение звука на открытом воздухе влияют не только градиенты ветра и температуры. На больших расстояниях для высоких частот очень существен другой фактор — вязкость воздуха. Так как частицы воздуха непрерывно совершают колебательные движения, то между соседними частицами возникают силы трения. Трение всегда приводит к поглощению энергии; на высоких частотах, когда соседние частицы колеблются друг относительно друга с большой скоростью, влияние трения может стать заметным. В результате трения звук частотой 10 кГц на расстоянии в 1 км затухает примерно на 40 дБ, это помимо ослабления, обусловленного законом обратных квадратов. Земля также поглощает звуковую энергию. Об этом мы узнаем в следующей главе. Если местность холмистая, заросшая лесом или покрыта снегом, поглощение может оказаться очень существенным.

До сих пор наши звуковые волны испытывали только действие ветра и температуры. Но ведь мы живем не в пустыне, и звуки, которые мы слышим на открытом воздухе, как правило, встречают на своем пути препятствия потверже, чем дуновение ветра. Что происходит, когда звуковая волна падает на твердую поверхность, мы узнаем еще только через две главы, но, так как обычно поверхности имеют ограниченные размеры, выясним уже сейчас, что происходит со звуком, обходящим края таких препятствий.

Представим себе длинную, совершенно звуконепропускаемую стену, ограниченную прямым краем. Что случится со звуковой волной, проходящей мимо этого края? По-видимому, многие скажут, что волна пройдет совершенно прямо и по другую сторону стены образуется звуковая тень. Во всяком случае, это происходит со светом, а ведь нас учили, что звук, как и свет, распространяется прямолинейно. Однако и для звука, и для света все обстоит иначе.

В самом деле, вспомним метод Гюйгенса для построения волны. Каждую точку фронта волны можно рассматривать как самостоятельный источник вторичных волн, излучающий маленькие сферические волны, а благодаря тому что точки расположены непрерывно, взаимодействие этих сферических волн приводит к образованию такого же нового фронта волны, продвинувшегося немного вперед. Но если фронт звуковой волны встречает край стены, только часть фронта пройдет мимо этого края. Поэтому точки на конце той части фронта, которая прошла мимо стены, окажутся без соседей с одной стороны. С этой стороны взаимодействие маленьких сферических волн, восстанавливавших основной фронт волны по мере его продвижения вперед, прекратится. В результате срезанный край фронта волны станет новым источником звука, излучающим сферические волны в область звуковой тени перпендикулярно направлению распространения основного фронта волны. Волны по-прежнему налагаются друг на друга, но результат получается совсем иной.

На рис. 34, *a* схематически изображено дальнейшее движение оборванных фронтов волн. Кроме того, для некоторого момента времени показаны вторичные сферические волны, излученные точками на оборванных концах фронтов. Для простоты на рисунке представлено только несколько точек по ходу движения фронта, а в действительности они образуют непрерывную линию. Что же происходит теперь? В направлении, перпендикулярном движению основных волн, все вторичные волны взаимно уничтожаются. Точки максимальных сгущений в одних волнах точно совпадают с точками максимальных разрежений в других. Но, чем ближе к линии прохождения края фронта, тем менее полно вторичные волны уничтожают друг друга. В результате, например, в точке *a* экранирующее действие стены выражено очень слабо, потому что вторичные волны комбинируются здесь преимущественно конструктивно и производят такой же звук, как и основные волны. Напротив, в точке *b* взаимодействие вторичных волн деструктивно и по чисто геометрическим причинам сопровождается их значительным

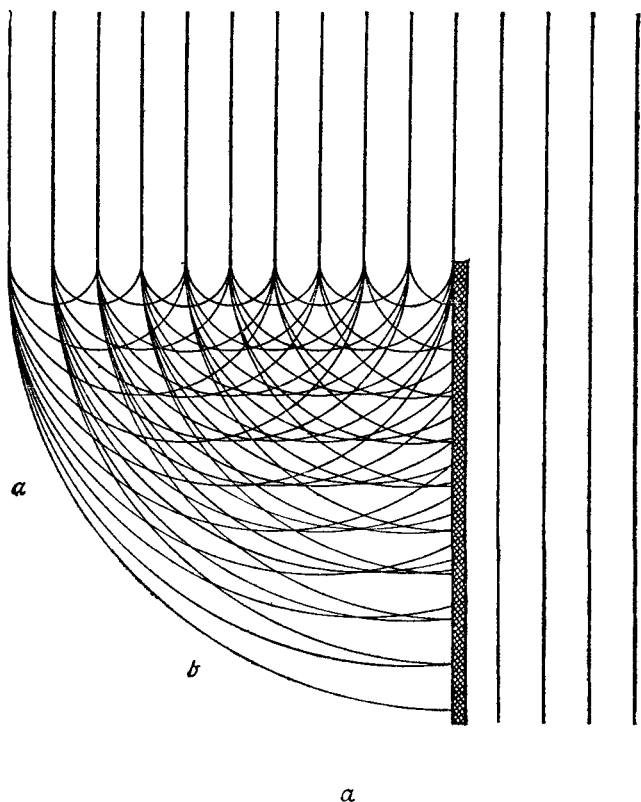
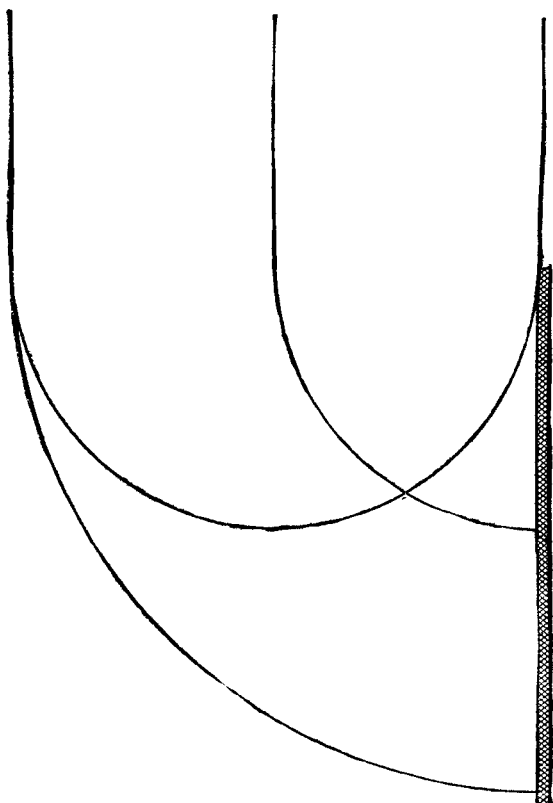


Рис. 34 (а) Картина прохождения ряда волновых фронтов мимо ребра стены.

взаимным уничтожением. Поэтому в точке *b* наблюдатель в основном защищен стеной от звука.

Теперь обратимся к рис. 34, б. Он аналогичен рис. 34, а, но относится к более низкочастотному, иначе, к более длинноволновому звуку. Различия между этими рисунками бросаются в глаза. Для длинноволновых звуков взаимное уничтожение вторичных волн далеко не так эффективно, и поэтому экранирующее действие стены проявляется только в области более глубокой звуковой тени. Напротив, для самых коротковолновых звуков взаимное уничтожение

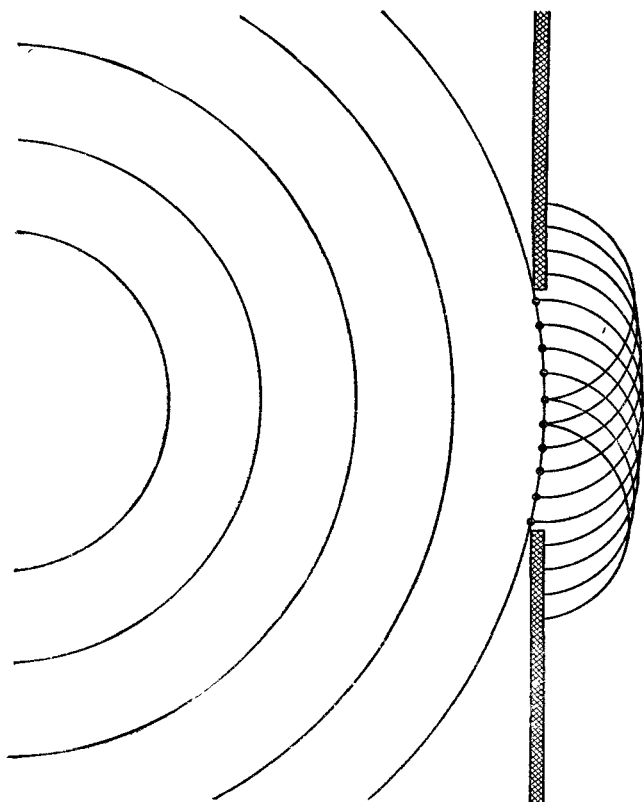


б

Р и с. 34 (б) То же, но при меньшей частоте звука.

вторичных волн происходит чрезвычайно эффективно почти до самых оборванных концов фронтов. Таким образом, высокочастотные звуки по своему поведению ближе к световым волнам, чем низкочастотные. Описанный выше процесс называется дифракцией; он присущ всем видам волн, в том числе и световым, хотя длина световых волн настолько мала, что обнаружить дифракцию света значительно труднее.

Как мы уже знаем, звуки, состоящие только из одной частоты, встречаются редко. Дифракция влияет на сложную волну так же, как и простую, но дифракция низкочастотных компонент выражена значительно



в

Р и с. 34 (в) Построение фронта волны методом Гюйгенса при излучении звука из отверстия.

сильнее. Чтобы установить, насколько велика будет дифракция в том или ином случае, необходимо знать расстояния от источника и приемника звука до стены, а также высоту этих объектов. Дифракция позволяет понять, почему мы слышим звуки от источников, которые находятся вне нашего поля зрения, как это часто наблюдается в самых разнообразных ситуациях. Как мы уже упоминали, говоря о звуковой тени, обус-

ловленной градиентами ветра и температуры, дифракция звука — один из факторов снижения эффекта затенения.

Процесс взаимного уничтожения вторичных звуковых волн играет большую роль, когда звук распределен в пространстве неравномерно. Нетрудно заметить сходство между описанием дифракции и объяснением направленности излучения, создаваемого колеблющейся пластиной. Когда плоские волны, бегущие по вентиляционной трубе, внезапно вырываются наружу, на конце ее происходит то же, что и при излучении звука колеблющейся стальной пластиной: высокочастотный звук направляется прямо вперед, тогда как для низких частот взаимное уничтожение вторичных волн по краям фронта оказывается менее полным, поэтому выходящий из трубы звук низкого тона имеет меньшую направленность и расходится в стороны. Явление, которое мы обозначали как «взаимное уничтожение» или «взаимодействие волн», на языке физики называют «интерференцией». Интерференция имеет место всегда, когда две волны одновременно проходят через одну точку. Это очень распространенное явление; впервые мы встретились с ним, рассматривая прохождение звука в резонансной трубе: в результате интерференции исходной и отраженной волн возникала стоячая волна. На этом принципе построены применяемые в лабораториях интерферометры — это особые резонансные трубы для измерения отражательной способности вещества, которое помещают на конце трубы.

Разумеется, отражение звука происходит не только когда звук доходит до конца трубы, но и в других случаях. Чаще всего отражение наблюдается при падении звука на большую плоскую твердую поверхность. Начнем с конца и, прежде чем обсуждать причины (см. гл. 8), рассмотрим некоторые следствия отражения звука. На рис. 6 и 7 было показано, что происходит при взаимодействии бегущих друг другу навстречу волн: образуется стоячая волна; она пульсирует, оставаясь на месте и не двигаясь ни в каком направлении. Эти рисунки относились к плоским волнам, бегущим по трубе, но с плоскими волнами приходится встречаться не слишком часто; у нас гораздо

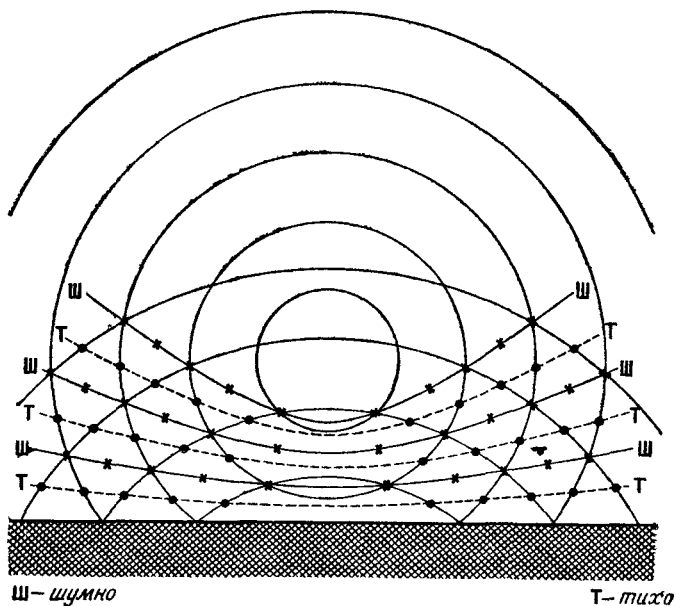


Рис. 35. Интерференция волны и ее отражения от плоскости.

больше шансов наткнуться на другой тип волн — на сферические волны. Что же происходит при отражении сферической волны?

На рис. 35 изображена «замороженная» сферическая волна. На рисунок нанесены и соединены друг с другом точки максимальных сгущений и разрежений в волне. Помимо падающей волны, на схеме показаны большая отражающая поверхность и отраженная сферическая волна. Здесь снова наблюдается интерференция сгущения и разрежения в одной волне будут взаимно уничтожаться или усиливаться при наложении на сгущения и разрежения в другой волне. Результат получается весьма любопытный: обнаруживаются определенные зоны, где обе волны постоянно взаимодействуют конструктивно, усиливая интенсивность звука, и другие зоны, где их взаимодействие постоянно деструктивно и приводит к снижению интенсивности звука до нуля. При низкочастотных звуках, с их большой длиной волны, эти зоны велики,

и поэтому при наличии в низкочастотном звуковом поле отражательных поверхностей можно оказаться в зоне значительной интенсивности звука, а перейдя в другое место, попасть в зону относительной тишины. Для высокочастотных же звуков такие зоны очень малы, так что одно ухо может оказаться в зоне большой интенсивности звука, а другое — в зоне тишины. Если подвигать головой, то можно попасть первым ухом в зону тишины, а вторым — в зону сильного звука

Мы рассмотрели процесс интерференции применительно лишь к чистому тону. Если звук содержит целый набор чистых тонов, интерференционная картина значительно усложнится. А в случае беспорядочного шума, не содержащего периодических компонент, интерференция вообще не имеет устойчивого характера, зоны сильной и слабой интенсивности звука не формируются, так как длины волн, фазы и амплитуды звуков, составляющих шум, непрерывно меняются.

Поглощение звука и дырки в потолке

Зайдем в любое здание современной конструкции и взглянем вверх: мы увидим на потолке тысячи мелких отверстий. Привычное зрелище — акустический потолок. Зачем? Многие приписывают рядом этих дырочек почти волшебное свойство «высасывать шум», или «распылять тишину» в помещении. Иные дав волю своему воображению, затевали постройку звуконепроницаемых стенок из перфорированных панелей; их ждало жестокое разочарование. Но другого и нельзя было ожидать. Акустический потолок — это просто плохой отражатель звука: когда звук бежит по воздуху и наталкивается на твердую, плотную преграду, он отражается, подобно тому как свет отражается от зеркала. Темная бумага — плохой отражатель света, и в нее не помотришься как в зеркало; если оклеить стены темными обоями, освещенность комнаты уменьшится. Акустический потолок — это всего лишь акустические темные «обои».

Что же в действительности кроется за словами «звук отражается хорошо» и «звук отражается плохо»? Мы воспринимаем факт отражения звука как нечто само собой разумеющееся. Однако, чтобы понять принцип действия различных поглотителей звука и правильно оценить, когда они полезны, а когда бесполезны, следует вернуться к проблеме отражения и рассмотреть ее более детально.

В большинстве случаев плоские твердые поверхности фактически ведут себя как акустические зеркала; толстая гранитная стена отражает 99% «ударяющегося» об нее звука, другие твердые поверхности отражают около 95% звука. Если вспомнить о децибелах и громкости, нетрудно увидеть, что при отражении

звуковая волна не претерпевает заметного или хотя бы легко измеримого снижения уровня. Что же происходит? Мы знаем, что звуковая волна — это волна сгущения, сопровождаемая разрежением, которая распространяется в воздухе с большой скоростью, подобно тому как передается толчок между не вплотную сцепленными вагонами поезда. Воздух в целом не движется, но для создания сгущений частицы воздуха должны сблизиться, чуть-чуть смещаясь вдоль линии распространения звука. Вследствие упругости воздуха сблизившиеся частицы быстро отскакивают назад и, минуя свое исходное положение, разлетаются друг от друга дальше, чем они находились в положении равновесия, — так возникает разрежение. Однако только немногие звуки создают правильное чередование сгущений и разрежений, чаще молекулы воздуха толкаются, как пассажиры метро в час пик¹.

Что же произойдет, если на пути волны сгущения встретится гранитная стена? Передаваясь от одного слоя молекул другому, сгущение дойдет до воздушного слоя, прилегающего к поверхности гранита, к тяжелой, твердой и жесткой стене. Когда частицы этого последнего слоя получают толчок сзади, у них уже не найдется соседей спереди, которым они могли бы передать толчок; частицы наткнутся на стену, и вблизи нее давление увеличится. Затем вследствие упругости воздуха частицы оттолкнутся от стены с возросшей силой давления и образуют новую волну сгущения, бегущую в обратном направлении и почти такую же сильную, как и волна, ударившая в стену.

Несмотря на всю свою жесткость, гранит тоже в какой-то малой степени податлив и также деформируется при воздействии давления. Когда мы стоим на гранитной глыбе, то именно сопротивление деформации дает нашим ногам опору и действует на них с силой, как раз достаточной для того, чтобы мы не провалились в гранит; это же сопротивление заставляет отскочить ударившийся о стену кусок гранита (впрочем, это уже из другой оперы). Аналогично, под давлением слоя воздуха, прижатого к поверхности стены, гранит

¹ Здесь речь идет, конечно, не о тепловом движении молекул, а о беспорядочном движении частиц среды при прохождении сложного звука типа широкополосного шума. — *Прим. ред.*

прогибается, хотя это прогибание ничтожно мало. Прогибание, или деформация, посылает звуковую волну внутрь гранита, и вот здесь-то и расходуется большая часть этого одного процента потерянной звуковой энергии.

Поглощенная гранитом энергия «изымается» из ударившей в стену волны, и от стены отражается всего 99% падающей энергии. Часть поглощенной энергии затрачивается на нагревание, которое сопровождает деформацию, но основная доля энергии уходит в гранит, о чем мы подробнее поговорим в следующей главе. Чем стена тоньше, легче и мягче, тем больше она деформируется под давлением звуковой волны. Если толщина стены мала по сравнению с длиной волны в ее материале, то стена прогнется как целое. Обычно так и бывает; в подобных случаях жесткость вещества стены не существенна, а главную роль играет инерция стены. Чем тяжелее стена, тем больше ее инерция и тем меньше она сдвигается под действием силы. Если футболист ударит ногой по мячу, мяч отлетит от его ноги, если же он ударит по скале, скала останется на месте, а он два-три дня не будет играть в футбол, но зато будет рассказывать, что его нога «отразилась» от скалы и сила отражения разбила ему пальцы на ноге. И, чем тяжелее скала, тем сильнее ушиб!

За исключением некоторых особых случаев, даже относительно легкая, но непористая стена отражает на всех частотах по меньшей мере 90% энергии звука. Такое большое отражение нас не устраивает, и разработка различных звукопоглощающих устройств — это попытки заставить отражающие поверхности поглощать возможно большую часть падающего звука, а не отсылать его обратно.

Возвращаясь к пограничному слою воздуха, напомним об одном обстоятельстве: если отпустить груз, закрепленный на пружине, он снова подпрыгнет вверх; но если снабдить пружину амортизатором наподобие автомобильного, в котором трение или силы вязкости сопротивляются движению пружины вверх и вниз, груз почти не подпрыгнет. Все видели, как прыгает вверх-вниз передок автомобиля с изношенными амортизаторами.

Как мы уже знаем, воздух может вести себя подобно пружине, и именно это свойство позволяет ему создавать отраженную волну и вообще передавать звуковые волны. Если бы воздух можно было амортизировать, как пружину, результат оказался бы тот же, что и для пружины. Когда на отражающей поверхности растет давление, частицы воздуха сближаются и чуть-чуть смещаются в направлении отражающей поверхности. Что же получится, если создать небольшое трение, затрудняющее передвижение частиц воздуха? Амортизация! Воздух частично утратит свои пружинящие свойства, так как преодоление трения, препятствующего движению частиц, создает тепло, а необходимая для этого энергия будет забрана из звуковой волны. Однако, если кто-то, узнав об этом, вздумает отапливать свой дом с помощью устройств, поглощающих шум самолетов, напомним ему, что даже при шуме в 100 дБ поток энергии составляет всего 0,01 Вт/м².

Создать необходимое трение очень легко; вспомним, что втягивать в себя воздух сквозь сигарету труднее, чем сквозь пустую трубочку, это обусловлено именно трением или, точнее, силами вязкости. Воздух обладает определенной вязкостью, хотя гораздо меньшей, чем, например, нефть. Но нефть испытывает большое сопротивление, когда протекает даже по широкой трубе; воздух также испытывает большое сопротивление, протекая через очень узкую трубочку, или просачиваясь между волокнами табака в сигарете. Поэтому, если вблизи отражающей поверхности поместить слой или мат из волокнистого или ячеистого материала, силы вязкости будут сопротивляться движению частиц воздуха при сгущениях и разрежениях и энергия у отраженной волны будет отбираться. При этом может возникнуть неожиданное затруднение: если волокна в мате уложены слишком тесно, его поверхность окажется излишне плотной, и тогда встанет уже известная нам проблема — волны будут отражаться от наружной поверхности мата. Следовательно, при выборе плотности материала поглотителя требуется найти какое-то компромиссное решение. Как выяснилось, наиболее эффективны волокнистые материалы с плотностью 50—200 кг/м³.

Очевидно, в ячеистых поглощающих материалах ячейки должны соединяться между собой открытыми порами.

Мы только начали свое знакомство с пористыми поглотителями, и прежде всего нам необходимо рассмотреть самый основной фактор, а именно зависимость поглощения звука от его частоты. Частота звука вообще играет определяющую роль в акустике. Как мы уже видели, большая часть звуков включает компоненты широкого диапазона частот с длинами волн примерно от 20 мм до нескольких метров. Для низкочастотных звуков с длиной волны в несколько метров поглощение в волокнистом слое толщиной 20—30 мм незначительно, но, если толщина слоя сравнима с длиной волны или даже превышает ее, поглотитель становится чрезвычайно эффективным. Увеличение толщины слоя на большой площади обойдется очень дорого; однако можно значительно улучшить поглощение, просто отодвинув пористый мат от отражающей поверхности. В этом случае усиление эффективности поглощения не связано, как при утолщении мата, с увеличением размеров области взаимодействия волны с волокнами; здесь действие волокон более эффективно потому, что на некотором расстоянии от отражающей поверхности движение частиц воздуха, совершающих низкочастотные колебания, более интенсивно. Поэтому силы вязкости со стороны волокон оказывают в этом месте большее воздействие.

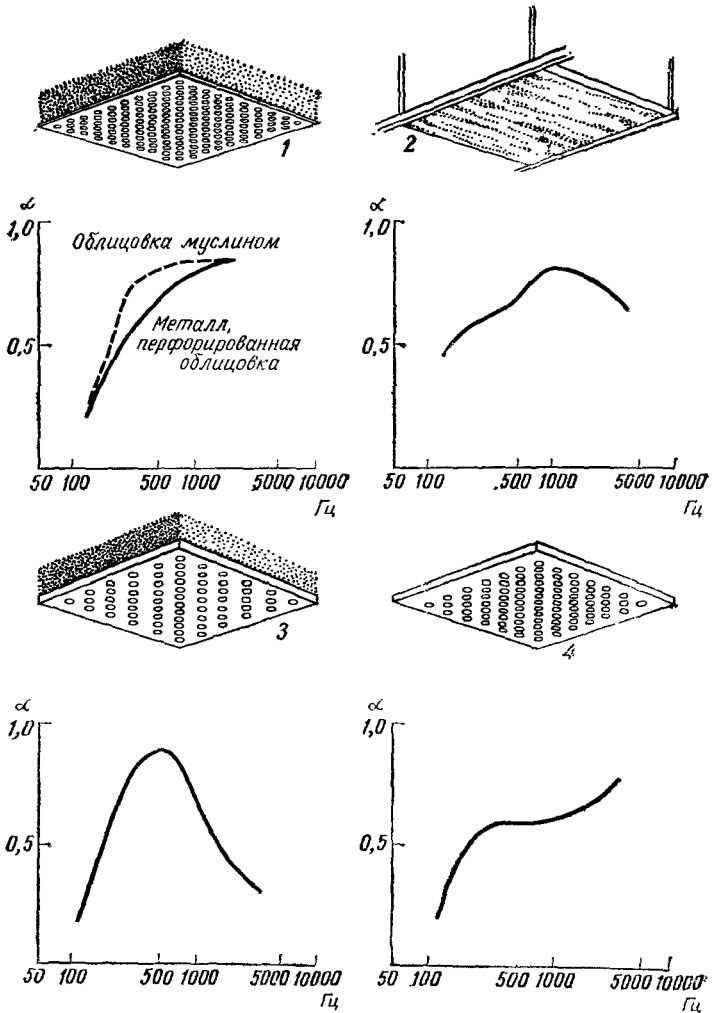
Но самое странное начинается тогда, когда длина волны оказывается меньше толщины волокнистого слоя. Чем выше частота, тем меньшее расстояние проходят частицы в процессе своих колебаний (при заданном звуковом давлении) и, следовательно, тем меньше подвергаются действию сил вязкости; на некоторых частотах волокнистый слой ведет себя подобно пружине, что уменьшает его эффективность. К тому же с ростом частоты возрастает отражающее действие наружной поверхности мата.

Из сказанного очевидно, что частота имеет первостепенное значение для эффективности поглощения звука. Большая часть пористых поглотителей мало что дает для низких частот, эти поглотители очень эффективны для средних и высоких частот и не-

сколько менее полезны при очень высоких частотах. Мужчина, говорящий по телефону из заглушенной будки, может заметить, что его голос становится более гулким, — это результат значительно меньшего поглощения низких компонент его голоса. В лучшем случае волокнистые маты в зависимости от пористости, плотности и толщины поглощают от 80% и почти до 100% звука на частоте, на которой их эффективность максимальна. У некоторых типов акустических плиток эффективность снижается до 60—70% — таковы жертвы, приносимые в угоду дешевизне, долговечности и внешнему виду. Зависимость поглощения от частоты для разных типов поглотителей показана на рис. 36. Эффективность представленных на рисунке материалов выражена посредством коэффициента поглощения α . Для поверхности, поглощающей 100% падающего на нее звука, коэффициент $\alpha = 1,0$, при поглощении 50% $\alpha = 0,5$ и т. д.

По сравнению с твердыми стенами, отражающими около 95% энергии падающего на них звука, стена, покрытая волокнистым слоем и отражающая всего 10 или 20%, казалось бы, поглощает очень сильно. Но так ли это? Никогда не следует забывать удивительное соотношение между громкостью и децибелами. В гл. 4 мы узнали, что падение интенсивности звука на 80% уменьшает уровень всего на 7 дБ. Из гл. 5 выяснилось, что изменение уровня на 10 дБ, грубо говоря, соответствует увеличению или уменьшению громкости вдвое. Отсюда следует, что пористые материалы чудес не совершают: если уровень упавшего на стену звука 80 дБ, а отраженного — 73 дБ, то остался еще очень громкий звук.

Читатель может подумать, что если силы вязкости так сильно влияют на отраженную волну, то они способны оказать не меньшее действие и на волну, вошедшую в стену или проходящую сквозь нее, и что, заполнив оконный проем слоем стеклянной ваты, мы задержим большую часть шума. Поразмыслим над этим! Звук, проходящий сквозь слой волокон, подвергается менее сильному воздействию, чем отраженный. В последнем случае волокна действуют на частицы воздуха и тогда, когда те движутся вперед при формировании волны сгущения, и тогда, когда отходят



Р и с. 36. Эффективность различных поглощающих материалов на разных частотах.

- 1—50-миллиметровый слой минеральной шерсти на твердом основании;
 2—подвешенная минерально-волоконная плита с щелевой перфорацией;
 3—перфорированная сухая штукатурка на подложке из минеральной шерсти;
 4—перфорированная древесноволокнистая плита.

назад при образовании отраженной волны; однако все происходящее с отраженной волной не имеет никакого отношения к волне, бегущей вперед. А в результате звук, идущий сквозь пористый мат толщиной, скажем, 20 мм или около того, ослабляется менее чем на 3 дБ, то есть едва заметно, так что цена стеклянной ваты не окупается!

Как мы уже видели, коэффициент поглощения $\alpha = 0,8$ не так уж хорош, однако в гл. 10 мы узнаем, что во многих случаях этого вполне достаточно. Но иногда необходимо поглощение, близкое к 100% в широком диапазоне частот, например в лабораториях или студиях. Каждое незначительное приращение эффективности поглощения сверх 80% дает все больший выигрыш в смысле снижения уровня отраженной волны, выраженного в децибелах, — еще одна из причуд этой шкалы; поэтому иногда есть смысл добиваться максимально возможного коэффициента поглощения. Но как?

Очевидный ответ на этот вопрос — начать наращивать толщину пористого мата. Однако одной этой меры недостаточно, а при низкочастотных звуках потребуется неосуществимо большая толщина. Кроме того, наружная поверхность покрытия сама представляет собой достаточно резкую границу, на которой отразится значительная часть высокочастотного звука. Правильное решение поставленной задачи — уложить волокна в длинные заостренные клинья, которые при необходимости можно поддержать редкой тканью. Эти поглощающие клинья следует расположить так, чтобы любой звук, отразившись от одного из них, тут же попадал на другой, затем на третий и т. д.; в результате интенсивность звука снизится до пренебрежимо малой величины. Высота таких клиньев может достигать метра и более; за ними создают воздушную полость, и эффективность такого покрытия приближается к 100% в очень широком диапазоне частот. Однако поглощающие клинья из-за их высокой стоимости и нелепого вида редко где находят применение, кроме помещений специального назначения.

Более дешевый, но менее эффективный способ заглушить звук в помещении состоит в применении слоев волокнистого или вспененного материала

возрастающей плотности. Снаружи укладывают самый тонкий и легкий слой с большими просветами, поверхность которого сама по себе не создает сколько-нибудь заметного отражения; однако слишком рыхлая структура этого слоя не порождает и достаточных сил вязкости. Следующие слои делают все более и более плотными, пока поглощение в них не достигнет значительной величины. Этим способом удается ослабить отражение от наружной поверхности поглотителя.

Но мы пока еще не объяснили, зачем же делают дырки в потолке! Вряд ли чье-нибудь любопытство удовлетворится утверждением, что эти дырки там ни к чему и что волокнистый материал позади них был бы так же эффективен. Чтобы усилить путаницу, добавим, что, если бы там не было и волокнистого материала, перфорированная облицовка продолжала бы поглощать звук! Если и это еще не достаточно парадоксально, можно сообщить дополнительно, что нет необходимости ни в дырках, ни в волокнах: самая простая панель тоже будет поглощать звук! И как это ни удивительно, все три утверждения совершенно справедливы.

Забудем на время о волокнах и покрытиях и поговорим о дырках в потолке, вернее, о дырках и некотором объеме воздуха, заключенном позади них. В связи с этим описанием вспомним самый обычный предмет — простую бутылку. Часто школьники ухитряются наигрывать мелодии на колпачках от самопишущих ручек, искусно дуя поперек отверстия колпачка, как в свисток. С бутылкой получится то же самое, только звук будет ниже, а если взять большую бутылку с коротким горлышком, например двухлитровую винную бутылку, и умело дуть, получится басовая нота. Несомненно, подобные сосуды были праотцами самых ранних духовых инструментов; тысячелетия назад первобытный человек мог слышать пение ветра над горлышком открытого сосуда. И позже во все времена люди извлекали звуки из сосудов. Витрувий упоминал, что поющие сосуды, или голосники, применялись в греческих театрах на открытом воздухе. Однако только в XIX веке Герман Гельмгольц заинтересовался этим явлением с научной точки зрения. Гельмгольцу и его современнику Рэлею принад-

лежат важнейшие исследования поглощения звука, и их именами названы два типа поглотителей звука: пористый поглотитель, впервые предложенный Рэлеем, — «рэлеевская копна» и «поющая бутылка», которая ведет себя как резонатор Гельмгольца.

Звуки, издаваемые бутылкой, когда мы дуем попереки ее горлышка, — просто резонанс, хотя несколько отличающийся от резонанса в трубе. Этот вид резонанса больше похож на поведение груза на пружине, чем на наложение прямой и отраженной волн, создающее в резонансной трубе стоячую волну большой амплитуды. Если заткнуть отверстие велосипедного насоса и нажать на его ручку, воздух внутри будет действовать как пружина. Если наверху пружины закрепить груз, нажать на нее и отпустить, груз будет регулярно колебаться вверх-вниз; при одной и той же пружине и одном и том же грузе эти колебания будут происходить с постоянной частотой. Обычно частота колебания пружины под грузом, так называемая собственная частота, относительно невелика — всего несколько сотен колебаний в минуту. Если нагрузка небольшая, а пружина достаточно тугая, собственная частота может увеличиться до многих сотен колебаний в минуту и попасть уже в слышимый диапазон. Почему пружины обладают собственной частотой? Если вместо того, чтобы заставлять груз колебаться вверх и вниз, мы осторожно и плавно опустим его на пружину, она сожмется на определенную величину, которая зависит не только от массы нагрузки, но и от жесткости пружины: жесткая пружина опустится на меньшее расстояние, чем мягкая. Для того чтобы сжаться под нагрузкой, пружине потребуется определенное время, как и для того, чтобы распрямиться, когда нагрузку снимут. Следовательно, частота колебаний пружины зависит от расстояния, которое она проходит при сжатии, и от скорости, с которой она сжимается. Все эти рассуждения применимы и к велосипедному насосу с заткнутым отверстием.

Оставим насос и вернемся к бутылкам — с ними происходит то же самое. Если в горлышко бутылки вставить поршень, воздух в ней, как и в велосипедном насосу, уподобится пружине, и в каждой данной бутылке поршень будет ходить вверх и вниз с частотой,

определяемой его весом. Уберем поршень — тогда в качестве груза останется только воздух в горлышке. Воздух внутри бутылки будет продолжать колебаться подобно пружине, только с гораздо большей частотой, потому что воздушная пробка в горлышке — сравнительно легкий груз. Частота колебаний воздуха настолько значительна, что получится слышимый звук, а чтобы возбудить и поддерживать эти колебания, потребуется только возмущение воздуха в горлышке бутылки, для чего достаточно дуть поперек отверстия.

Собственная частота пружины определяется не только упругостью, но и массой ее витков. То же относится и к воздуху в бутылке: у маленького объема воздуха упругость больше, чем у большого. Поэтому заданное движение воздушной пробки в горлышке вызовет в малом объеме воздуха пропорционально большее сгущение или разрежение, чем в большом. Постепенно заполняя бутылку водой, можно услышать, как по мере роста упругости уменьшающегося объема воздуха повышается собственная частота бутылки. Эта частота в такой же степени зависит и от размеров горлышка, играющего роль груза: чем оно короче и шире, тем легче, а следовательно и быстрее происходят колебания воздуха. У двух поллитровых бутылок с горлышками разной ширины частоты колебаний будут различными: у бутылки с более узким горлом частота ниже. Форма и длина горлышка также влияют на частоту, но довольно сложным образом, и вычисление точной резонансной частоты бутылки может оказаться довольно хлопотным.

Какое отношение, однако, все это имеет к поглощению звука? Вделаем бутылку в стену так, чтобы ее отверстие было заподлицо с поверхностью стены, потом определим, хотя бы экспериментально, ее собственную частоту и направим на стену волну звука этой частоты. Проследим за участью волны сгущения: вот она подошла к отверстию бутылки: ее приход подействует, как толчок на груз, висящий на пружине, — воздушная пробка в горлышке будет вталкиваться внутрь бутылки. Сразу после этого пробка выскочит обратно, проскочит положение равновесия, и воздух выйдет из горлышка. Воздушная пробка, совершая такие колебания, сама станет источником

звука и будет посылать в обратном направлении (то есть отражать) такую же звуковую волну. Так как колебания в бутылке происходят с той же частотой, что и в падающей звуковой волне, воздушная пробка начнет повторное движение точно в тот момент, когда подойдет следующая волна сгущения, то есть спустя полный цикл колебаний после первой волны. При колебаниях пробки ее энергия будет непрерывно превращаться из потенциальной в кинетическую и обратно. Эту энергию передают пробке и первое и последующие сгущения, так что сначала амплитуда колебаний пробки растет.

Если звук внезапно оборвать, колебания воздушной пробки спустя короткое время прекратятся. Отчего? Теоретически они, казалось бы, должны продолжаться вечно¹, но, как и во всех «вечных двигателях», движению препятствует трение, или уже знакомая нам сила вязкости. В трубе ближайший к стенкам слой воздуха прилипает к ним. Это явление связано с поверхностным натяжением стенок и воздуха. Если дуть вдоль трубы, воздух посередине трубы двинется вперед и при этом молекулы воздуха будут скользить по своим соседям, удерживаемым на стенках трубы. Сопротивление скольжению создает вязкое торможение и поглотит часть энергии, которая превратится в теплоту. Чем быстрее движение воздуха в трубе, тем больше вязкое торможение.

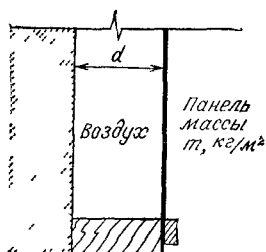
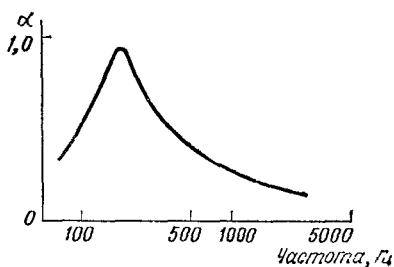
Горлышко бутылки можно рассматривать как короткий отрезок трубы, где действуют малые силы вязкости, оказывающие сопротивление движению воздушной пробки. Это воздействие сил вязкости и приводит к остановке воздушной пробки после прекращения подачи звука. Но это значит, что силы вязкости действовали и при наличии звука, то есть имел место непрерывный расход энергии, поэтому колебания и не усиливались до бесконечной амплитуды.

¹ Даже теоретически колебания не будут продолжаться вечно в отсутствие поглощения: колебания воздуха в горлышке резонатора излучают сферическую звуковую волну наружу и колебательная энергия резонатора постепенно «высвечивается» в виде этих звуковых волн. — *Прим. ред.*

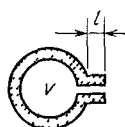
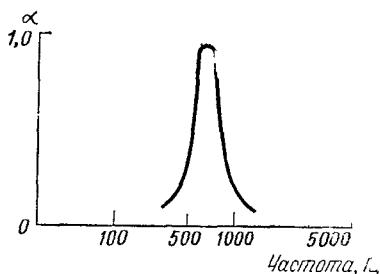
Когда частота звуковой волны и собственная частота колебаний воздуха в бутылке совпадают, то есть при резонансе, частицы воздушной пробки движутся вперед-назад гораздо быстрее, чем частицы воздуха в падающей звуковой волне, и расход энергии на преодоление вязкого торможения становится весьма значительным. Если уменьшить отверстие горлышка, натянув на него, например, слой марли и оставляя открытыми только отверстия в ткани (объем воздуха в бутылке следует отрегулировать так, чтобы резонансная частота бутылки осталась прежней), то, очевидно, силы вязкости значительно вырастут и с прекращением звука колебания воздушной пробки также прекратятся практически после одного периода. Другими словами, к тому моменту, когда воздушная пробка должна была бы выйти из горлышка, она уже потеряет столько энергии, что звуковая волна, которую она пошлет обратно (то есть отразит), окажется совсем ничтожной. Вот мы и получили поглотитель!¹

При резонансе поглощение звука может достигать почти до 100%. Можно вынудить воздух в бутылке колебаться с частотой, близкой к собственной частоте, но не совпадающей с ней, и, чем больше разница между этими частотами, тем слабее колеблется воздух в бутылке. По этой причине резонансная полость или простой резонатор Гельмгольца эффективен только при частоте, близкой его собственной частоте или совпадающей с ней. Это видно из рис. 37. Диапазон частот большого поглощения можно расширить, если наполнить горлышко бутылки волокнистым материалом, но максимальная эффективность поглощения при этом понизится: при частотах, отличных от собственной частоты, колебания продолжают возбуждаться, но значительно уменьшается амплитуда резонансного колебания; поэтому нельзя получить звук, дунув над отверстием бутылки с горлышком, набитым волокнистым материалом. Следовательно, такой резонатор действует в более широком диапазоне частот,

¹ В действительности наибольшее поглощение получается при гораздо меньшем трении, когда после прекращения возбуждения число колебаний упадет всего вдвое по сравнению со случаем отсутствия поглощения — *Прим ред.*



$$f_{\text{рез}} = \frac{60}{\sqrt{md}} \text{ Гц}$$



a — площадь сечения горлышка

$$f_{\text{рез}} = 60 \sqrt{\left(\frac{a}{l} \frac{1}{V}\right)} \text{ Гц}$$

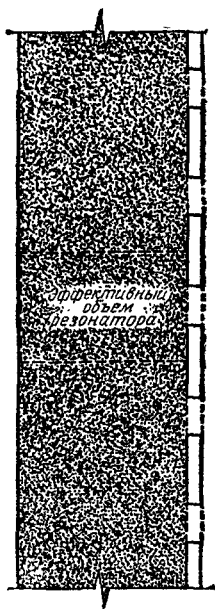
Р и с 37 Поглощение звука панелью и резонатором Гельмгольца.

но его максимальная эффективность значительно снижена¹.

Наконец-то мы добрались до дырок в потолке. Теперь их назначение легко объяснить: если сложить вместе множество бутылок, стенки их окажутся ненужными — горлышки и объемы самих сосудов будут резонировать так же хорошо (рис 38). Если горлышки достаточно узкие, можно обойтись без марли, так как сила вязкости будет достаточной. Многие акустические плитки — это просто набор резонаторов Гельмгольца, наполненных волокнистым материалом, в которых убраны лишние стенки.

Это частично и объясняет парадоксальные утверждения, сделанные ранее в этой главе. Мы уже

¹ В действительности эффективность резонатора снизится во всем диапазоне частот, но, поскольку снижение наиболее значительно вблизи резонанса, эта уменьшенная эффективность будет сохраняться в более широком диапазоне частот. — Прим ред.



Р и с. 38. Акустическая плита, действующая на звук так же, как резонатор Гельмгольца.

говорили о высокой эффективности поглощения звука простым пористым покрытием без перфорированной или какой-либо другой облицовки. Иными словами, акустический потолок без всяких дырок, а просто представляющий собой слой минеральной шерсти, стеклянной ваты или подходящего пенистого материала, вполне пригоден как поглотитель звука. Трудно только удержать такой пласт на потолке! Волокнистые материалы очень непрочны и легко распадаются на кусочки, а кусочек стеклянной ваты, попавший за шиворот, весьма сомнительное удовольствие. Кроме того, даже полужесткие поглотители из листов микропористого материала имеют весьма непривлекательный внешний вид, способный отпугнуть любого декоратора помещений от всяких попыток использовать звукопоглощающие материалы.

Конечно, с помощью сеток можно предотвратить осыпание с потолка волокнистых слоев, но внешний

вид потолка при этом не улучшится; если же применить сплошное покрытие, потеряется эффект пористости. Над решением этой задачи немало поломали голову те, кто впервые задумал организовать массовое производство акустических плит: Прежде всего необходимо было добиться выработки изделий, прочных и приятных на вид. Изобретатели начали с лучшей, точнее, с единственной имевшейся в их распоряжении комбинации материалов: минеральной шерсти, удерживаемой на месте мелкой проволоочной сеткой. Сначала использовали крупноячеистую сетку, затем переходили на все более мелкие отверстия и измеряли поглощение звука, чтобы определить, как сильно при этом снижается эффективность поглотителя. Когда открытую площадь отверстий сократили до 30% от общей площади, то неожиданно для всех выяснилось, что потери эффективности очень незначительны: поглощение несколько упало лишь в высокочастотной области. Вскоре удалось найти почти идеальный вариант покрытия — слой минеральной ваты толщиной 25 мм, прикрытый перфорированным стальным листом, который можно было эмалировать. Такое устройство хорошо поглощало звук, и на него был выдан патент.

Все это происходило около пятидесяти лет назад; сейчас акустические покрытия самых разных типов наводнили рынок. Некоторые из них имеют оригинальную конструкцию, другие различаются типом используемых волокнистых материалов; изготавливают и жесткие покрытия из окрашенных поверхностей, перфорированных малыми или большими отверстиями, расположенными регулярно или беспорядочно. Часто делают отверстия разных размеров, что придает потолку менее скучный внешний вид и позволяет более широко раздвинуть резонансные частоты, значения которых зависят от величины отверстий. Изготавливают также покрытия со щелями. Отверстия не обязательно должны быть круглыми.

Эффективность таких поглотителей несколько различается, но для всех характерна малая эффективность поглощения на низких частотах (ее удается улучшить, помещая поглотитель на некотором расстоянии от стены), большая эффективность для средних и высоких частот и несколько меньшая — для

очень высоких частот. Выше мы рассматривали отверстия как элементы резонаторов, однако резонанс лишь частично обуславливает эффективность покрытия. Отверстия и металл между ними мало сказываются на низкочастотных длинноволновых звуках, и для них покрытие действует так, как если бы перфорированной облицовки совсем не было. При средних и высоких частотах эффективность использования волокнистого материала как поглотителя могла бы ухудшиться вследствие уменьшенной площади отверстий, но это снижение компенсируется возникновением резонансного эффекта отверстий. При очень высоких частотах эффективность поглощения снова падает, потому что эти частоты лежат выше резонансных частот, и для коротковолнового звука участки металла между отверстиями служат хорошими отражателями.

Что можно сказать по поводу утверждения, что акустический потолок может поглощать звук и без отверстий или волокнистых материалов? Теперь это нетрудно объяснить. Как мы уже знаем, бутылка — это самый обычный резонатор, но ведь есть и другой столь же обычный резонатор — барабан. Если ударить в барабан, он издаст музыкальный звук, хотя, из-за множественных резонансов, и не очень определенной частоты, но тем не менее это будет некоторая нота. По существу, барабан не так уж сильно отличается от бутылки, только в нем воздух заключен в гибкую оболочку, которая при натяжении приобретает упругость, и таким образом вводит в действие добавочные факторы — свои массу и упругость. Масса барабанной кожи играет роль груза на пружине, а ее натяжение и упругость воздуха внутри барабана совместно действуют как пружина. Если ослабить натяжение кожи барабана, он перестанет звучать при ударе, потому что мягкую, провисшую кожу нельзя заставить колебаться: ее упругие свойства проявляются только под натяжением. Такая кожа будет похожа на амортизатор, который мы рассмотрели в этой главе, но по-прежнему сохранит одну из своих функций, продолжая служить оболочкой для определенной массы воздуха. Заключенный в ней воздух не утратит свойств пружины и сможет колебаться, если только получит достаточно энергии, чтобы перемещать обо-

лочку. Как и в случае нагрузки на пружину, чем тяжелее кожа, тем ниже собственная частота, а чем меньше объем воздуха, тем более упруга воздушная пружина, а значит, тем выше частота.

Если такой барабан со слабо натянутой кожей установлен на стене и на него падает звуковая волна, частота которой совпадет с собственной частотой барабана, то непрерывное поступление энергии волны будет достаточно для того, чтобы вызвать резонанс барабана; но в процессе движения и сгибания ненапрянутой кожи барабана значительная часть этой энергии израсходуется в результате поглощения. Чем пластичнее и мягче кожа, тем сильнее она гасит колебания и тем больше энергии поглощает (конечно, поглощенная звуковая энергия при этом превращается в тепловую энергию). Как и в других аналогичных случаях, если барабан набит волокнистым материалом, резонансные свойства станут менее выраженными и барабан будет легче вынудить к колебаниям на других, близких частотах.

Рабочая характеристика подобного панельного, или мембранного, поглотителя очень сходна с характеристикой резонатора Гельмгольца, но только для гораздо более низких частот. У резонаторов Гельмгольца практически нет верхней частотной границы, но нижняя граница есть: она определяется предельно допустимыми габаритами резонатора и лежит вблизи 100 Гц. Собственная частота панельного поглотителя зависит от массы панели и глубины воздушного пространства за ней; полезный диапазон частот такого поглотителя простирается от 40 до 400 Гц. Для более высоких частот трудно подобрать достаточно легкую оболочку. Такой поглотитель можно изготовить из любого материала, отвечающего следующим основным требованиям: подходящая масса, достаточное затухание и достаточная гибкость. Масса и глубина воздушного слоя определяют резонансную частоту; затухание не позволяет самой панели стать вторичным источником звука и обеспечивает поглощение энергии; гибкость мембраны создает возможность низкочастотного резонанса. Незадемпфированные жесткие панели могут только ухудшить положение в результате появления гармоник. Однако этим обстоятельством

можно воспользоваться, если ввести поглощение таким образом, чтобы панели сохраняли резонанс на частотах гармоник и при этом поглощали и более высокие частоты. Жесткие панели часто изготавливают из фанеры, но у таких панелей недостаточное внутреннее трение. Делая с обратной стороны прорези, можно снизить жесткость панели, почти не уменьшая ее массу, а добавочное поглощение удается получить, нанося на панель специальную оклейку Мягкую панель можно сделать из одного-двух слоев толевого картона; для расширения частотного диапазона эффективности поглощения в воздушное пространство между картоном и стеной часто помещают волокнистый мат.

Где целесообразно применять резонансные поглотители? Они эффективны в ограниченном диапазоне частот, и их размеры должны быть строго подобраны. В результате усиления колебаний воздуха — а именно оно лежит в основе механизма их действия — звуковое давление на заднюю стенку полости возрастает и большее количество звука поступает в стену. Повторяется старая история: поглотители поглощают звук, то есть уменьшают энергию в проходящей волне, но одновременно помогают этой волне проникнуть в стену, поэтому для звуковой изоляции они совершенно бесполезны.

Однако для некоторых целей резонансные поглотители чрезвычайно полезны; избирательность их действия может обернуться преимуществом, например если потребуется погасить в помещении стоячую волну определенной частоты или уменьшить эхо в концертном зале. Панельные резонаторы эффективны в области низкочастотных звуков, для поглощения которых другими способами потребовались бы слои волокнистого материала огромной толщины. Существует немало приемов, позволяющих расширить диапазон эффективного поглощения звука панельными резонаторами: можно, например, скосить заднюю стенку полости резонатора или разнообразить размеры отверстий. Резонаторы Гельмгольца с успехом применяют также в специальных глушителях, предназначенных для случаев, когда шум преимущественно сосредоточен на одной определенной частоте.

Звуконепроницаемость — разоблаченный миф

«Звуконепроницаемость» — какое великолепное слово! Инженеров-акустиков всегда просят обеспечить звуконепроницаемость. Ведь водонепроницаемая обшивка не пропускает воду, так почему бы не существовать специальной обшивке, которая бы не пропускала звук? Так как роль отверстий в акустических плитках огромна, у инженеров возникла сплошная путаница между понятиями поглощения и изоляции звука. И не удивительно, потому что вопрос не прост. В предыдущей главе мы самым подробным образом объяснили, что устанавливать тонкий пористый мат с целью задержать звук, идущий из одной точки в другую, — это просто потеря времени. Максимум, чего можно добиться таким путем, — это снизить уровень на 3 дБ на высоких частотах.

Конечно, пористые материалы поглощают звук, а так как они частично уменьшают энергию звука, они уменьшают и энергию волны, проходящей через них. Но для того чтобы получить мало-мальски стоящее затухание, толщина слоя поглощающего материала должна быть сравнима с длиной звуковой волны. Так как на практике часто приходится иметь дело со звуковыми волнами длиной в несколько метров, ясно, что об использовании поглощающих материалов непосредственно в качестве звукоизоляторов не может быть и речи. Что же применить в таком случае? Из какого вещества изготовить «звуконепроницаемость»? По-видимому, требуется нечто необыкновенное, поскольку вполне разумное значение звукоизоляции 40 дБ означает, что интенсивность звука нужно уменьшить в десять тысяч раз!

Вернемся назад и снова внимательно присмотримся к тому, что происходит, когда звуковая волна падает на некоторую поверхность. Обычно большая часть звуковой энергии отражается, некоторое количество ее поглощается и переходит в тепло, а часть проникает через поверхность. В силу закона сохранения энергии в каждом случае сумма всех этих долей энергии: отраженной, поглощенной и прошедшей — всегда должна равняться энергии волны, падающей на поверхность. Так как нам желательно уменьшить долю прошедшей волны, логично попытаться увеличить долю отраженной или поглощенной волны. Но увеличить поглощение нельзя: это требует большого объема и дорогих материалов (кроме случая высоких частот); поэтому остается только увеличивать интенсивность отраженной волны за счет прошедшей.

В такой постановке проблема упрощается: чем больше отражает поверхность, тем меньше звука проникает через нее. В предыдущей главе мы рассмотрели условия отражения звука. Так, гранитная стена настолько массивна и так мало сжимаема, что легкие молекулы воздуха не могут оказать на нее заметного воздействия. Для дальнейшего нам было бы полезно располагать некоторой мерой, которая одновременно учитывала бы и упругость, и плотность вещества. Вспомнив, что скорость звука в среде зависит от упругости и плотности этой среды, в качестве такой меры мы можем выбрать волновое сопротивление среды. Понять значение этой величины несложно. Плотность гранита велика, а вследствие его малой сжимаемости скорость звука в нем также велика. Поэтому волновое сопротивление гранита огромно. В результате этого, как мы уже знаем, при падении звуковой волны из воздуха на гранитную стену отражается больше 99% падающей энергии. Но если бы мы заменили гранитную стену «стеной» воздуха, скачка от малого к большому импедансу не было бы, а потому исчезло бы и отражение. Чем больше различие (несогласование) импедансов двух сред, тем больше отражение и тем меньшая доля падающей волны проходит из одной среды в другую.

Однако около 1% звуковой энергии все же входит в гранит, и, поскольку стена не бесконечно толстая,

часть энергии, которая проникла в гранит и не поглотилась в нем, дойдет до второй границы стены. Теперь возникает вопрос о переходе звука из гранита снова в воздух. Поскольку импеданс гранита велик, ничтожные смещения его частиц уже создают высокие давления в волне; однако эти же смещения создадут в воздухе лишь весьма малое давление. Поэтому волна, распространяющаяся в граните, при падении на его границу с воздухом создаст в воздухе волну весьма малой интенсивности: передача энергии снова будет малоэффективна.

Толстая, плотная каменная стена — наилучший простой изолятор звука. На высоких частотах кирпичная стена толщиной всего 350 мм обеспечивает снижение звука более чем на 60 дБ. Однако целесообразно ли добиваться звукоизоляции, возводя тяжелую каменную стену толщиной во много десятков сантиметров? Это можно делать только в самом крайнем случае. Обычно строят стены настолько тонкие, что обе их стороны движутся почти синфазно, поскольку толщина стены мала по сравнению с длиной волны. Тогда задача о распространении звука в материале стены перестает интересовать нас, а поведение звуковой волны принимает другой характер.

Представим себе тонкую панель или перегородку площадью 3 м^2 , имеющую опору, но не закрепленную по периметру. Если с одной стороны приложить к ней постоянное давление, она прогнется, и величина прогиба будет целиком определяться ее упругостью (жесткостью). Так, резиновая панель сильно выгнется, тогда как стальная едва поддастся. Если давление на одну сторону будет медленно переходить от положительного к отрицательному, возникающие выпучивание и выгибание панели по-прежнему будут определяться ее упругостью. Однако поскольку панель обладает инерцией, при достаточном увеличении частоты знакопеременного давления ее масса начнет сказываться в той же степени (а затем и больше), что и упругость. Представим себе дверь, подвешенную на упругих петлях. Если попытаться медленно покачивать дверь вперед-назад, ее движение в основном будет ограничиваться упругостью подвески. Если же начать быстро дергать дверь туда и обратно, то

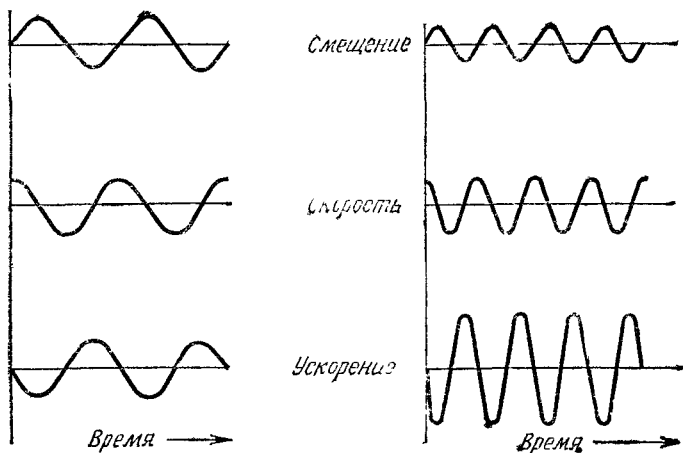


Рис. 39. Изменение смещения, скорости и ускорения панели от времени (при двух частотах колебания, справа частота вдвое выше, чем слева).

главную роль начнет играть ее инерция: фанерную дверь гораздо легче раскачивать, чем дубовую, даже если упругость петель не изменилась.

Поэтому говорят, что на очень низких частотах передача звука через панель управляется ее упругостью, но по мере роста частоты инерция (масса) становится значительно более существенной. Поясним это на примере, когда возбуждающая сила — синусоидальный звук (чистый тон). В этом простейшем случае смещение панели синусоидально. Мы уже знакомы с графиком синусоидальной функции. Скорость изменения положения — это скорость, скорость же изменения скорости — ускорение. На рис. 39 показаны графики смещения, скорости и ускорения для панели, колеблющейся на некоторой определенной частоте, а также на частоте вдвое большей. При данном звуковом давлении с увеличением частоты смещение убывает по амплитуде, но скорость частиц остается без изменения. Далее, на рисунке видно, что при этом скорость изменения скорости стала вдвое больше: максимальное значение ускорения удваивается при удвоении частоты. Но, согласно второму закону Ньютона, ускорение прямо пропорционально приложенной

силе. Таким образом, теоретически при удвоении частоты потребовалась бы вдвое бóльшая сила, чтобы заставить панель колебаться с той же скоростью. Однако, так как действующая со стороны звуковой волны сила не изменилась, удвоение частоты звука приведет к уменьшению амплитуды колебаний панели вдвое.

По другую сторону от панели картина такова, как если бы источником звука была панель. Звук, падающий с одной стороны, приводит ее в колебания, и эти вынужденные колебания излучают с другой стороны звуковые волны — ослабленные копии падающих волн. Поскольку при удвоении частоты амплитуда скорости уменьшается вдвое, можно ожидать, что звуковое давление излучаемых с другой стороны волн также уменьшится вдвое. Теоретически так и есть. Вспоминая, что при уменьшении звукового давления вдвое уровень его уменьшается на 6 дБ, приходим к заключению, что удвоение частоты увеличивает звукоизоляцию на 6 дБ.

Как мы знаем из второго закона Ньютона, ускорение обратно пропорционально массе тела. Отсюда следует, что при данной частоте звукоизоляция панели увеличивается на 6 дБ при каждом удвоении массы панели. Однако это чисто теоретические рассуждения, и, как мы скоро увидим, на практике возникает множество обстоятельств, в результате которых поведение панели не следует этому «закону масс». Вместо улучшения изоляции на 6 дБ в самом лучшем случае удастся добиться не более 4—5 дБ. Эмпирически полученный «закон масс» выглядит, как показано на рис. 40.

Какие же ловушки подстерегают проектировщиков при создании звукоизолирующих перегородок? Если руководствоваться исключительно законом масс, то можно встретиться с весьма неприятными сюрпризами. Всякая перегородка обладает не только массой, но и упругостью. Хотя мы видели, что звукоизоляционные свойства перегородки определяются ее упругостью лишь на очень низких частотах, это не значит, что в других случаях упругость не играет роли. Вспомним медные тарелки из гл. 3, они резонируют именно вследствие своей упругости. От мягкой

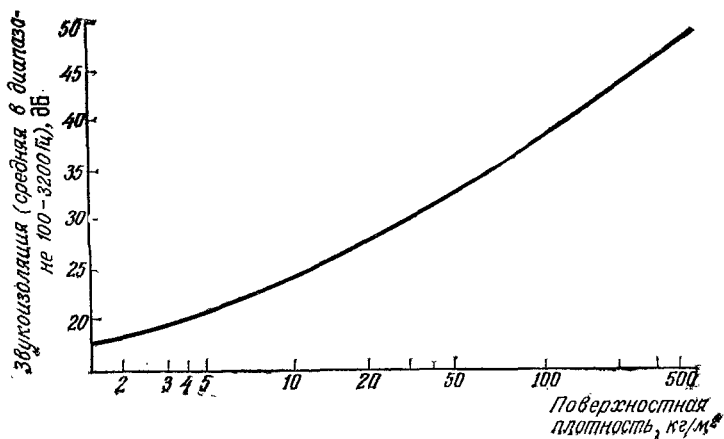
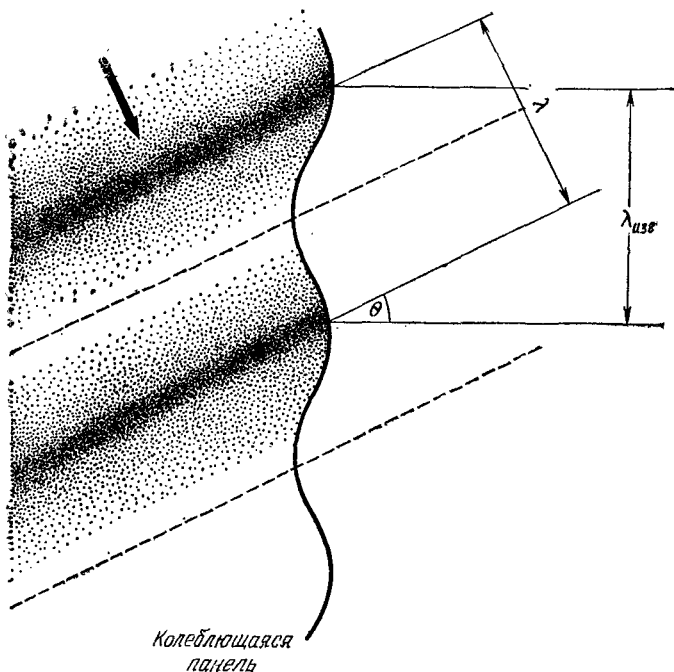


Рис. 40. Закон масс.

тарелки не было бы никакого проку. А перегородка, находящаяся под постоянным односторонним давлением? Величина ее прогиба определяется ее упругостью. Если давление внезапно снять, перегородка выгнется в обратную сторону, и это произойдет тем быстрее, чем больше упругость перегородки. Приобретая скорость, она проскочит положение равновесия и успеет совершить несколько колебаний туда-сюда, прежде чем успокоится. Частота этих колебаний — резонансная частота перегородки — определяется упругостью и массой перегородки. Если частота падающей волны равна или близка резонансной частоте, то перегородка будет сильно раскачиваться под действием этой волны; в результате передача звука с одной ее стороны на другую будет происходить очень эффективно. Поскольку перегородка может резонировать на многих частотах, становится очевидным, что закон масс сильно нарушается.

И чтобы еще более усложнить проблему, обнаруживается дополнительный тип резонансов, который также нужно принимать во внимание. То, о чем только что было сказано, напоминает резонанс груза, подвешенного на пружине, с которым мы подробно познакомились в предыдущей главе. Однако, говоря о медных тарелках, мы описывали резонанс, связанный



Р и с. 41. Эффект совпадений.
 $\lambda = \lambda_{изг}$ соответствует критической частоте.

с изгибными волнами, бегущими по их поверхности. А по перегородке также могут бежать изгибные волны, как показано на рис. 41. Это волны совсем другого типа, чем звуковые волны в твердой среде, но они тоже характеризуются частотой и длиной волны. При наклонном падении звуковой волны на перегородку может оказаться, что длина волны звука, отсчитываемая вдоль перегородки, и длина изгибной волны на ней совпадают. В этом случае перегородка также начинает усиленно раскачиваться, что сопровождается весьма эффективной передачей звука с одной стороны на другую. Из рис. 41 видно, что для данной длины изгибной волны существует такая частота падающего звука, ниже которой подобный «эффект совпадения» невозможен, так как даже при падении волны точно вдоль перегородки длина волны звука

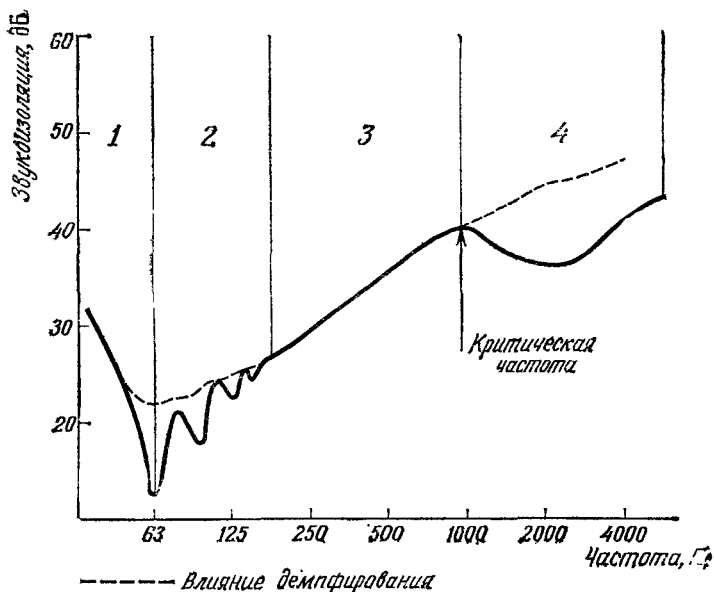


Рис. 42. Типичная частотная характеристика звукоизоляции однослойной незадемпфированной перегородки.

1 — затухание определяется упругостью; 2 — область резонансов; 3 — затухание определяется массой; 4 — область эффекта совпадений.

оказывается больше, чем длина изгибной волны. Эту частоту называют критической.

Из всего сказанного следует, что перегородка, масса которой представляется достаточной, чтобы обеспечить хорошую изоляцию звука, на самом деле вследствие эффектов резонанса и совпадения оказывается почти бесполезной на целом ряде частот. Частотная зависимость звукоизоляции такой перегородки будет выглядеть так, как показано на рис. 42: закон масс окажется выполненным лишь в узкой полосе частот в середине спектра. Что же можно сделать? Одним из способов улучшить изоляцию является попытка расширить эту центральную полосу, сдвинув резонансные частоты как можно дальше вниз, а критическую частоту — как можно дальше вверх по спектру.

Прежде всего выясним, какую роль может сыграть упругость в осуществлении этой задачи. Чем подат-

ливей пружина, к которой прикреплена масса, тем ниже собственная частота. Уменьшение упругости перегородки не только понизит ее собственные частоты, но и укоротит изгибную волну, которая снижает изолирующие свойства панели, и тем самым повысит критическую частоту. Более тонкая перегородка также имела бы более высокую критическую частоту, но при этом уменьшилась бы ее масса, что, как мы уже знаем, нежелательно.

Следующий прием — увеличение массы перегородки; это выгодно не только в силу закона масс, но также и потому, что если это можно осуществить, не увеличивая упругость перегородки, удастся также снизить резонансные частоты и поднять критическую частоту.

Существует, однако, и другой способ решить нашу проблему, и его можно использовать как независимо, так и совместно с вышеуказанными мерами. Он заключается в следующем: вместо того чтобы отодвигать резонансы и критические частоты в дальние концы спектра (где ведь также может понадобиться хорошая звукоизоляция), попытаться снизить амплитуды резонансных колебаний и волны совпадений. Потеря изоляционных свойств перегородки в результате резонанса вызвана тем, что при резонансе к энергии, полученной перегородкой от упавшей на нее волны, прибавляется энергия, приносимая все новыми волнами. Если бы эту энергию удалось каким-то образом поглотить, эффект резонанса значительно бы снизился.

Для деформации кусочка замазки или глины достаточно затратить небольшую энергию. После деформации кусочек остается в новом состоянии, не приобретая какой-либо потенциальной энергии. Куда же девалась энергия, затраченная на деформацию такого пластичного материала? Она поглотилась в результате трения между молекулами замазки или глины и обратилась в тепло. Это как раз то, что нам нужно: если покрыть резонирующую перегородку слоем какого-либо пластичного вещества вроде глины, то при каждой деформации перегородки в процессе резонансных колебаний слой также будет деформироваться и поглощать энергию. Этим способом можно

вести затухание в колебания перегородки. Конечно, обмазывать перегородку глиной не очень-то удобно, но существует множество материалов — от смол до различных патентованных составов, — которые действуют подобным образом. На рис. 42 пунктиром показано действие вводимого таким путем затухания: в результате даже чрезмерно упругая перегородка становится пригодной для целей звукоизоляции.

Теперь мы можем сформулировать несколько положений, которыми необходимо руководствоваться при проектировании звукоизолирующих перегородок. Для всех частот, кроме самых низких, определяющими факторами являются:

- 1) большая масса,
- 2) малая упругость,
- 3) высокое затухание.

Конечно, многие материалы сами по себе в той или иной степени обладают внутренним затуханием, и поэтому не всегда необходимо вносить затухание извне. Например, внутреннее затухание в фанере велико — в сто раз больше, чем в стали или алюминии. Однако при равных массах фанера обладает гораздо большей упругостью, чем стальной лист. Поэтому при введении достаточного затухания, например путем нанесения демпфирующего состава, стальной лист оказывается гораздо лучше фанеры, так как его резонансные частоты ниже, а критическая частота выше. Наилучшим материалом был бы свинец: его масса значительна, упругость мала, а затухание велико. Но свинец дорог. В Приложении 1 даны величины плотности (массы), упругости и критической частоты для различных материалов. Вообще, для однослойных перегородок задемпфированный стальной лист — наилучший вариант с точки зрения стоимости, практичности и звукоизолирующих свойств.

Однако существуют изоляторы звука гораздо более эффективные, чем однослойные перегородки. Допустим, имеется задемпфированная перегородка с малой упругостью и с поверхностной плотностью 5 кг/м^2 и нам требуется улучшить звукоизоляцию. Что для этого следует сделать? Если считать, что резонансы и эффект совпадений уже по возможности подавлены, то остается одна свободная переменная — масса.

Можно увеличить массу перегородки, но даже если это удастся сделать, не увеличивая ее упругости, то, как следует из закона масс, при удвоении массы нельзя рассчитывать больше, чем на 6 дБ, а практически лишь на 5 дБ. Вряд ли такое увеличение звукоизоляции оправдывает двойной расход материалов. Если учесть, что улучшение на 15 дБ потребует увеличения поверхностной плотности до 40 кг/м^2 , то этот путь мало заманчив, особенно если увеличение веса недопустимо с инженерной точки зрения.

В начале этой главы мы говорили о роли волнового сопротивления при передаче звука. Для упрощения, обсуждая поведение тонких перегородок, мы не касались импедансов, и, возможно, напрасно, потому что, говоря о втором законе Ньютона, об увеличении ускорения или массы, мы просто иными словами повторяли соображения, относящиеся к несогласованным импедансам. Реактивным массовым импедансом (или удельным импедансом передачи) перегородки называют произведение массы перегородки на частоту. Теперь рассмотрим механизм звукоизоляции перегородки как результат несогласования импедансов между воздухом и перегородкой со стороны, откуда падает звук, и между перегородкой и воздухом с той стороны, куда звук передается.

Что произойдет, если вместо удвоения массы перегородки мы поставим позади первой вторую перегородку, оставив между ними небольшой воздушный промежуток? Суммарная масса будет вдвое больше, как если бы мы просто удвоили толщину первой перегородки, однако при этом мы ввели еще два фактора, обуславливающих нарушение согласования импедансов, — дополнительные переходы звука из воздуха во вторую перегородку и из нее снова в воздух. Поэтому можно ожидать, что двойная перегородка окажется более эффективной, чем однослойная перегородка двойной массы. Так оно и получается на самом деле. А если бы удалось раздвинуть перегородки достаточно далеко друг от друга, оставив между ними большой воздушный промежуток, то общий эффект почти равнялся бы арифметической сумме изоляций, выраженных в децибелах, создаваемых каждой из этих перегородок в отдельности.

К сожалению, обычно приходится ставить перегородки близко друг к другу и, кроме того, каким-либо образом, например шпильками, соединять их механически друг с другом. Механические соединения увеличивают импеданс воздушного промежутка по сравнению с импедансом свободного воздуха снаружи перегородки, в результате степень несогласования импедансов внутри такой перегородки уменьшается. Тем не менее двухслойные перегородки много эффективнее, чем эквивалентные однослойные, и дают выигрыш в 10 дБ и более. При этом все проблемы, связанные с резонансами и эффектами совпадений, по-прежнему остаются существенными и даже усложняются. Появляется новый резонанс: воздух между перегородками может вести себя как резонансная труба, уже описанная в этой книге, что также снижает звукоизоляцию. К счастью, нетрудно снизить резонансный эффект слоя воздуха, применив какой-либо пористый материал. Такой слой действует на воздух подобно демпферу и влияет на резонансные свойства воздушной полости так же, как демпфирующие слои на однослойную перегородку.

Можно было бы без конца увеличивать звукоизоляцию, добавляя все новые и новые перегородки. Главным фактором здесь становится степень механической изоляции одной перегородки от другой. Если между перегородками расположен пружинящий слой типа микропористой резины, вне резонансной частоты такой «пружины» все будет хорошо, а при резонансе решающую роль сыграет степень задемпфированности слоя. К сожалению, хорошее демпфирование в межперегородочном пространстве означает повышение импеданса, а поскольку импедансы перегородок высоки, следует по возможности уменьшать импеданс промежуточного слоя. Поэтому, помещая между перегородками упругий слой или упругие элементы, предпочтительнее бороться с резонансом слоя путем уменьшения резонансной частоты (уменьшая для этого коэффициент упругости слоя), а не путем применения повышенного демпфирования.

Иногда нельзя обойтись без жесткого механического соединения между перегородками. Если воздушный промежуток узкий, а стенки тяжелые, то

результатирующий эффект мало отличается от изоляции, создаваемой одиночной перегородкой с той же суммарной массой. Например, двойная кирпичная стена толщиной 280 мм с воздушным промежутком внутри толщиной 50 мм и с множеством металлических связей между обеими половинками немногим лучше, чем сплошная стена толщиной 230 мм. Можно несколько улучшить положение, убирая связи и все, что может передавать колебания, например заполняющую щебенку, а воздушную полость заполнить микропористой резиной, однако, чтобы при этом изоляция заметно возросла, потребуется увеличить воздушный промежуток по крайней мере до 100 мм.

Наиболее известный пример осуществления принципа двойной перегородки — это двойные оконные рамы. И здесь, как и в других аналогичных случаях, господствует путаница. Так, двойная рама со стеклами, жестко закрепленными в раме на расстоянии 20 мм друг от друга, дает не большую изоляцию, чем рама с одним стеклом суммарной массы. Акустическая двойная рама должна удовлетворять трем требованиям:

1. Воздушный промежуток должен составлять 100 мм или более.

2. По крайней мере одно из стекол должно быть закреплено не жестко.

3. Оконные притолоки должны иметь звукопоглощающую облицовку.

Боюсь, что сказанное может повредить продаже обычных теплоизолирующих двойных рам. Жители северных стран, например Норвегии, с давних пор устанавливают двойные рамы с большим воздушным промежутком. Поэтому в этих странах проблема возрастающего транспортного шума стоит менее остро, чем в других.

Можно указать много примеров применения многослойных перегородок для целей изоляции звука. В Приложении 2 приведены данные по звукоизоляции некоторых типов перегородок и панелей. В крайних случаях, в частности для студий и акустических лабораторий, следует строить бетонное помещение, внутри которого строят второе полностью независимое бетонное помещение, подвешиваемое на податливых

креплениях, так чтобы между обоими помещениями оставался большой воздушный промежуток. К поверхностям стен прикрепляют слой звукопоглощающего материала, и твердые соединения между помещениями полностью отсутствуют. В таком помещении необходимы двери специальной конструкции, но об этом мы расскажем в гл. 13.

Другой пример — плавающий пол. Его основу составляет бетонная плита, на которую кладется мат из минеральной шерсти и пятидесятимиллиметровый настил, подкрепленный проволоочной сеткой. Это одна из лучших конструкций звукоизолирующего перекрытия, при условии что мат завернут на краях и отсутствует «акустическое короткое замыкание», например при контакте с плинтусом. Такое перекрытие также весьма эффективно уменьшает передачу ударного звука с верхних этажей на нижние. Плавающие полы и изоляцию от ударного звука мы также рассмотрим в гл. 13.

Пожалуй, наиболее непроизводительный расход с точки зрения акустики — это установка жильцами акустических плиток на потолках своих квартир, с помощью которых они надеются улучшить звукоизоляцию потолков. Как мы увидим в следующей главе, небольшой эффект действительно есть, однако вовсе не потому, что уменьшается передача звука через потолок. Хотя, как мы видели, пятидесятимиллиметровый пористый мат может уменьшить интенсивность проходящего через него звука на 3 дБ, даже этот мизерный выигрыш не достигается при расположении мата на потолке. Это объясняется тем, что импеданс пористого мата имеет промежуточное значение между импедансами воздуха и основного перекрытия, и поэтому смягчает резкость скачка, создавая более плавный переход от малого к большому значению импеданса. Поскольку в данной конструкции изоляция звука определяется именно резкостью несогласования импедансов, наличие пористого мата приводит к увеличению количества звука, проникающего внутрь потолка. Правда, в целом изоляция не ухудшается, потому что в мате силы вязкости, действующие между волокнами или внутри пор, приводят к поглощению энергии и снижению интенсивности примерно на

те же 3 дБ; в результате звукоизоляция потолка не изменяется.

Теперь рассмотрим, как повлияет отверстие в звукоизолирующей перегородке на ее звукоизоляцию. Это нужно знать, так как во многих перегородках приходится проделывать отверстия, а даже если их и закрывают, то используют для этого материал с худшими звукоизолирующими свойствами, чем стена. Так, в стенах имеются дверные проемы, а массы дверей меньше соответствующих масс стен. Хуже того, стены зачастую имеют непредусмотренные отверстия. Как же влияют отверстия и участки с худшей звукоизоляцией на результирующий эффект?

Мы много говорили об измерении звукоизоляции в децибелах, однако точно не установили, что за этим кроется. Вопрос несложен: если звукоизоляция перегородки составляет 40 дБ на частоте 1 кГц, это значит, что уровень интенсивности прошедшей волны на 40 дБ меньше, чем уровень интенсивности падающей волны. Выше мы говорили, что при колебаниях перегородки, вызываемых падающим звуком, ее заднюю сторону можно рассматривать как источник звука. В гл. 4 мы объяснили, как измерять в децибелах полный энергетический выход источника звука — уровень мощности источника. Поэтому можно суммировать весь звук, излучаемый задней стороной перегородки, и рассчитать таким образом уровень звуковой мощности. Уровень интенсивности звука, как мы знаем, это отношение соответствующих значений, выраженных в единицах Вт/м², представленное в децибелах. Стена площадью 4 м² излучит энергию, равную интенсивности (в Вт/м²), умноженной на 4. Конечно, складывать величины, выраженные в децибелах, следует не по арифметическому, а по логарифмическому правилу; для этого нужно воспользоваться таблицей, данной в Приложении 3. Таким образом, для перегородки площадью 4 м² при уровне проходящей волны 50 дБ и частоте 100 Гц уровень мощности прошедшей волны будет равен 56 дБ (одну удвоение площади даст 3 дБ, второе — еще 3 дБ).

Теперь сделаем в стенке отверстие. Что произойдет? На рис. 43 дан график, позволяющий произвести расчет: исходя из относительной доли площади

с низкой звукоизоляцией и площади с большой звукоизоляцией находят потерю изоляции перегородки, обусловленную «плохими» участками.

В качестве примера рассмотрим перегородку с трещиной у пола. Пусть площадь трещины составляет всего $1/500$ часть площади перегородки, и пусть на частоте 4 кГц звукоизоляция перегородки равна 60 дБ. Согласно рис. 43, трещина снизит звукоизоляцию перегородки на целых 33 дБ! Отсюда ясно, как важно тщательно ликвидировать всякие трещины и зазоры во всех случаях, когда необходима хорошая звукоизоляция. Поразительно, как редко доходят до понимания этого обстоятельства! Ниже мы увидим, насколько важно герметизировать дверь по всему периметру. Кирпичные стены всегда следует штукатурить, чтобы не оставалось сквозных пор.

Неблагоприятный эффект малых отверстий особенно сильно сказывается на высоких частотах. Волны отражаются от отверстий, малых по сравнению с длиной волны, а не проходят через них. Читателя это

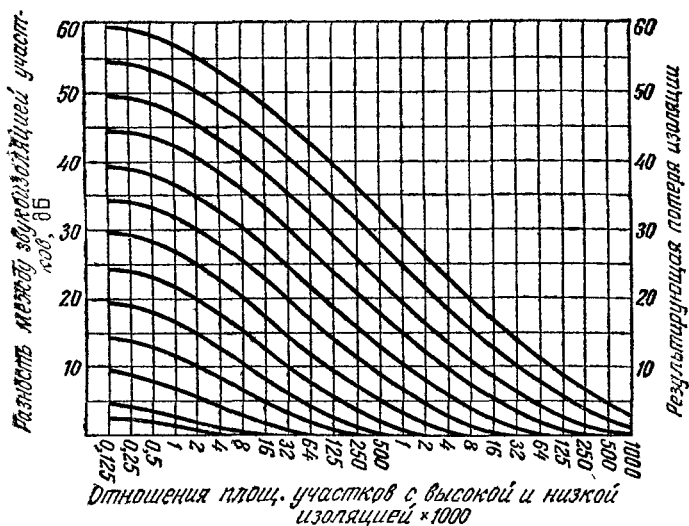


Рис. 43. Снижение изоляции при наличии участков малой изоляции на перегородке с большой звукоизоляцией (множитель 1000 относится к правой половине рисунка).

не должно удивлять: мы видели, что резонансы в трубе вызываются отражением волн от открытых концов. Здесь мы вновь сталкиваемся с различием импедансов: импеданс отверстия в стене выше, чем импеданс свободного воздуха. Поскольку же почти любая звукоизолирующая перегородка гораздо более эффективна на высоких, чем на низких частотах, утечка звука скажется более сильно на высоких частотах.

Для звука, прошедшего через отверстие средних размеров, характеристика направленности оказывается различной для высоких и низких частот — это обусловлено дифракцией и интерференцией. Пучок высокочастотного звука, исходящий из отверстия, направлен прямо перпендикулярно стене. Низкочастотный звук дифрагирует во все стороны, и его характеристика направленности больше похожа на полусферу.

Итак, подведем итоги тому, что мы узнали о звукоизоляции.

1. Для однослойной перегородки требуется высокая поверхностная плотность (например, кирпичная перегородка толщиной 230 мм имеет плотность 400 кг/м^2). Поскольку удвоение или уменьшение в два раза массы перегородки дает изменение ее звукоизолирующей способности всего на 4—5 дБ, оказывается, можно применять и перегородки с поверхностной плотностью всего 5 кг/м^2 , при условии что

2. упругость перегородки мала (за исключением случаев, когда требуется изолировать только низкие частоты, 30 Гц и ниже). При малой упругости резонансы колебаний и резонанс совпадений раздвигаются на края частотного диапазона, где эти явления обычно менее существенны. В противном случае следует иметь в виду, что резонансы и эффект совпадений значительно снижаются, если

3. перегородка сильно задемпфирована либо вследствие внутреннего трения в материале перегородки, либо в результате нанесения на ее поверхность слоя поглощающего материала.

4. Наилучшая звукоизоляция при заданном суммарном весе достигается путем применения двух или большего числа отдельных перегородок, связанных между собой возможно более податливыми связями. Звукоизоляция улучшается при увеличении воздушного

промежутка между перегородками. Поскольку резонансы промежуточного воздушного объема могут снизить звукоизоляцию (в наихудшем случае двойная перегородка может оказаться хуже однослойной),

5. промежуточное пространство должно быть заполнено тем или иным звукопоглощающим веществом. В ряде случаев можно заставить поглотитель весьма эффективно выполнять вторую функцию — нести на себе вторую перегородку, как, например, в случае плавающих полов или листового материала с наклеенным на него слоем микропористой резины.

6. Эффект изоляции может оказаться катастрофически сниженным при наличии трещин, зазоров и отверстий, однако, как показывает рис. 43, и в случае, когда от участков с меньшей изоляцией освободиться нельзя, еще не все потеряно.

7. Нанесение на стены звукопоглощающих материалов, например пористых матов, само по себе не улучшает звукоизоляцию.

8. Звукоизолирующие перегородки и панели почти всегда создают большую изоляцию на высоких частотах и зачастую очень малую на низких. Частично это связано с законом масс (улучшение изоляции на 5 дБ при удвоении частоты), а частично с тем, что резонансы обычно имеют место на низких частотах. Поэтому выражение звукоизоляции перегородки каким-то одним числом децибел вводит в заблуждение, и весьма важно провести расчеты для всего диапазона интересующих нас частот. Для этого удобнее пользоваться октавными полосами частот (см. гл. 4). Иногда тем не менее оперируют неккими усредненными величинами звукоизоляции, выраженными в децибелах, для всего диапазона частот от 100 до 3200 Гц.

Помещения, строения и концертные залы — «летающие блюдца» под крышей

Весельчаки, распевающие в ванной комнате, хорошо знают, что в помещении звук ведет себя иногда совершенно иначе, чем звук в открытом пространстве. Шоферы замечают, что при выезде из гаража резко падает уровень шума мотора. Все, кому приходилось переезжать с квартиры на квартиру, помнят, как странно звучат их голоса в пустых, лишенных мебели комнатах.

Причины всех этих явлений довольно просты, но они играют гораздо большую роль, чем это кажется на первый взгляд. Изучение поведения звука в помещениях не менее важно, чем любой другой аспект акустики, и не только потому, что наслаждение, испытываемое тысячами любителей музыки, зависит от познаний архитектора в области акустики, но и, быть может, еще в большей степени потому, что разнообразные шумы, которые возникают в помещениях и наносят вред слуху работающих там людей, во многом зависят именно от окружения. Настоящая глава как бы подытоживает все сказанное в предыдущих главах, и здесь мы покажем, как явления излучения, дифракции, поглощения и отражения, комбинируясь тем или иным путем, способны либо доставлять удовольствие, либо портить жизнь всем, кто находится в помещениях.

Для начала рассмотрим небольшое пустое помещение, размеры которого лишь в несколько раз превышают длину волны интересующего нас звука. Пусть в середине такого помещения начинает работать маленький ненаправленный источник чистого тона. Звуковые волны побегут от него во всех направлениях и

вскоре достигнут стенок (стен, пола и потолка помещения). Если эти стенки твердые и жесткие, как в ванной комнате, они отразят примерно 95% звуковой энергии, то есть звуковые волны отразятся почти полностью, как свет от зеркала. Но мы знаем, что комбинация падающей и отраженной волн образует стоячую волну. Поэтому во всем объеме помещения установится система стоячих волн той же длины, что волна падающего звука. Если окажется, что расстояние между какими-либо двумя из трех пар параллельных стенок помещения равно длине волны звука или составляет целое кратное от нее, то в результате конструктивной интерференции стоячая волна будет все более усиливаться, и мы придем еще к одному типу резонанса. Помещение можно рассматривать как трехмерную резонансную трубу.

К сожалению, картина стоячих волн в малом помещении чрезвычайно сложна ввиду всевозможных комбинаций из его длины, ширины и высоты, которые и определяют частоты возможных резонансов. Если у нас нет под рукой счетной машины, то нам придется долго трудиться, рассчитывая частоты всех резонансов, получивших название «нормальных» или «собственных» колебаний. Субъективный эффект этих нормальных частот — двоякий: во-первых, при постоянной частоте звука можно, двигаясь по помещению, попадать то в участки с повышенной интенсивностью звука, то в участки с пониженной интенсивностью: во-вторых, — любители петь в ванной комнате знакомы с этим — некоторые ноты получают преимущество, выделяются и усиливаются. Нота, которая так жиденько звучала в спальне, в ванной комнате будет спета прелестно и полнозвучно.

Если не ограничиваться только низкими частотами, число собственных колебаний оказывается столь значительным и они распределяются по такому большому числу различных частот, что на каждое из них в отдельности можно не обращать внимания: звук, издаваемый источником, снова и снова отражается от стенок помещения, но, за исключением низких частот, никакой ясно выраженной картины стоячих волн не получается. Образуется так называемое диффузное поле. В этом случае гораздо легче выяснить, как

влияет наличие стенок помещения на уровень звука, создаваемый данным источником.

Рассмотрим сферический источник звука с уровнем звуковой мощности 100 дБ. Согласно закону обратных квадратов, в открытом пространстве уровень интенсивности звука на расстоянии 3 м от такого источника составит 79 дБ. Внесем этот источник в большое помещение размерами, скажем, $10 \times 10 \times 3$ м. Допустим, что коэффициент поглощения стен, потолка и пола в этом помещении равен 0,05 (так будет, если помещение построено, например, из оштукатуренного кирпича или бетона). Что мы услышим теперь? Во-первых, по-прежнему прямой звук будет приходиться непосредственно от источника к уху, и, если мощность источника не изменилась и между ним и ухом не поставили какого-либо препятствия, уровень интенсивности этого звука по-прежнему составит 79 дБ. Однако, после того как мы услышали прямой звук, волна пробежит далее и упадет на стены, пол и потолок. Эти поверхности поглотят 5% звуковой энергии, а 95% отразят обратно к нам. Звуковые волны снова пробегут мимо нас, и этот процесс будет повторяться снова и снова. Чтобы звук потерял 20% своей энергии, то есть чтобы его уровень упал на 1 дБ, он должен испытать более четырех отражений. В результате добавления всех последовательных отражений, следующих друг за другом, пока они совершенно не затухнут, интенсивность первой отраженной волны окажется увеличенной в 18 раз. Можно показать, что в результате от сложения всех отражений интенсивность звука увеличивается в

$$\frac{1 - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \text{ раз,}$$

где $\bar{\alpha}$ — средний коэффициент поглощения стенок помещения. Эту величину нетрудно рассчитать. Различные материалы поглощают разную долю падающего на них звука, и их коэффициент поглощения для различных частот можно получить путем соответствующих измерений. В Приложении 4 даны значения коэффициента поглощения для ряда материалов. Полное поглощение данного участка материала определяется как произведение коэффициента поглощения на

площадь этого участка, а полное поглощение в помещении равно сумме таких величин для всех участков поверхности стенок помещения. Средним коэффициентом поглощения называют отношение этой суммарной величины к полной площади поверхности всех стенок. В очень больших помещениях, например в крупных концертных залах, вязкость самого воздуха также вызывает потери энергии («воздушное поглощение»), которые для высоких частот необходимо принимать в расчет.

Рассчитав интенсивность первой отраженной волны и умножив ее на 18, мы получим полную интенсивность звука, обусловленную отражениями. Поскольку мы ищем величину, характеризующую помещение в целом, следует рассчитать усредненное значение. Предположим, помещение имеет сферическую форму. Тогда на поверхности сферы интенсивность звука, приходящего от источника, расположенного в центре, равна полной мощности источника, умноженной на $1/(4\pi r^2)$. Если бы все стенки полностью отражали звук, отраженная волна вновь бы сходилась в центре и ее суммарная интенсивность равнялась бы мощности источника. Но нас интересует не интенсивность звука в центре или на стенке, а средняя по всему помещению интенсивность отраженной волны. Правильный результат мы получим, рассчитав интенсивность на середине радиуса; это дает для соответствующего множителя значение

$$\frac{1}{4\pi \left(\frac{r}{2}\right)^2} = 4 \frac{1}{4\pi r^2}.$$

Подобный же результат мы имели бы и для прямоугольного помещения: средний уровень первой отраженной волны при полном отражении от всех стенок составил бы долю $4/S$ от звуковой мощности источника, где S — полная площадь стенок помещения. Поэтому суммарный уровень отраженного звука равен

$$\text{УЗД} = \text{УЗМ} + 10 \lg \frac{4(1 - \bar{\alpha})}{S\bar{\alpha}},$$

где УЗМ — уровень звуковой мощности источника, а УЗД — уровень звукового давления.

Для удобства часто вводят так называемую константу помещения $R = S\bar{\alpha}/(1 - \bar{\alpha})$. Тогда предыдущая формула принимает вид

$$\text{УЗД} = \text{УЗМ} + 10 \lg \frac{4}{R}.$$

В большей части частотного диапазона удвоение $\bar{\alpha}$ дает снижение уровня на 3 дБ. Чем больше площадь стенок помещения, то есть его размеры, тем меньше уровень отраженного звука («уровень реверберации») при том же значении $\bar{\alpha}$.

В нашем примере уровень мощности источника равнялся 100 дБ, поверхность стенок помещения имела площадь 320 м², а средний коэффициент поглощения был принят равным 0,05. Подставляя все эти величины в полученную формулу, находим

$$\begin{aligned} \text{УЗД} &= \text{УЗМ} + 10 \lg \frac{4(1 - 0,05)}{320 \times 0,05} = \\ &= 100 + 10 \lg 0,24 = 100 - 6 = 94 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Если учесть, что тот же источник создавал на расстоянии 3 м уровень звукового давления прямого звука всего 79 дБ, то ясно, насколько растет шум, создаваемый источником, когда он находится в помещении.

Эффект отражений в помещении называют реверберацией, и полученное значение 94 дБ относится к реверберационному звуку. Почти всегда присутствует также и прямой звук, с учетом которого полная формула для суммарного уровня звука принимает вид

$$\text{УЗД} = \text{УЗМ} + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right),$$

где Q — коэффициент направленности источника звука, r — расстояние от слушателя до источника звука и R — константа помещения.

При анализе этой формулы возникает интересный вопрос: если $\bar{\alpha} = 0$, то есть стенки полностью отражают звук, то интенсивность звука в помещении бесконечно велика. После несложных рассуждений мы приходим к заключению, что так и должно быть: источник звука все излучает и излучает энергию, которая,

отражаясь от стенок, все накапливается в помещении¹ (конечно, на практике полностью отражающих поверхностей не бывает). Другое важное следствие: если увеличить средний коэффициент поглощения стенок $\bar{\alpha}$, то уровень реверберационного звука существенно упадет. Так, если в нашем помещении с площадью стенок в 320 м² $\bar{\alpha}$ увеличить от 0,05 до 0,1, то в помещении станет тише на 3 дБ. Если бы удалось получить коэффициент поглощения $\bar{\alpha} = 0,5$, то стало бы тише на 13 дБ.

Итак, ясно, что для большей части частотного диапазона удвоение среднего коэффициента поглощения приводит к снижению шума на 3 дБ. Но в верхней части частотного диапазона при большом помещении, когда можно было бы ожидать действия «закона сокращающихся доходов», в действительности происходит нечто обратное. Правда, подобный вид поглощения встречается только в очень специальных условиях, например в заглушенной камере: здесь увеличение коэффициента поглощения всего на 3%, с 0,95 до 0,98, приводит к снижению уровня на 4 дБ².

Чтобы определить в обычных условиях малого коэффициента поглощения, на сколько децибел удастся снизить шум при том или ином увеличении коэффициента поглощения, нет необходимости рассчитывать константу помещения — все, что нужно знать, это во сколько раз выросла величина $S \bar{\alpha}$: улучшение равно десятикратному логарифму этой величины.

Вернемся снова в наше реверберирующее помещение с уровнем звука 94 дБ. Чтобы прямой звук срав-

¹ Рассуждая таким образом, автор, по-видимому, принимает, что источник излучает постоянную мощность и поглощение в воздухе отсутствует. Более реально говорить об источнике с постоянной объемной скоростью; тогда интенсивность стремится к конечному значению, если только частота излучения не совпадает с какой либо из собственных частот колебаний помещения. — *Прим. ред.*

² Приведенная цифра (4 дБ) относится только к реверберационному звуку, который в этом случае мал по сравнению с прямым звуком. Поэтому изменение α почти не скажется на суммарном уровне звука в помещении, и по отношению к этому суммарному уровню «закон сокращающихся доходов» справедлив. — *Прим. ред.*

нялся по величине с реверберационным, пришлось бы приблизиться к источнику звука на расстояние 300 м. При увеличении коэффициента поглощения стенок помещения уровень реверберационного звука снизится и на больших расстояниях от источника будет преобладать прямой звук: реверберационный звук примерно постоянен во всем помещении, тогда как прямой убывает по мере удаления от источника.

Что произойдет, если внезапно выключить источник звука? Мгновенно ли наступит тишина? Нет, так как необходимо известное время для того, чтобы последние звуковые волны, излученные источником, успели достаточное число раз отразиться от стенок и поглотиться практически полностью. Ударьте в реверberирующем помещении в ладоши, и вы сами услышите, как постепенно затухают звуковые волны, бегущие от одной стенки к другой. Время T , в течение которого звук затухает на 60 дБ, называют «временем реверберации» данного помещения. В лабораторных условиях удастся получить время реверберации, достигающее 15 с. Если посетителю баптистерия в Пизе (расположенного по соседству со знаменитой «падающей башней») удастся уговорить хранителя исполнить арпеджио, то, поскольку время реверберации в баптистерии равно 12 с, аккорд будет звучать около четверти минуты, и посетитель заметит удивительное изменение тембра звука: прежде всего затихнут высокочастотные звуки, а низкие частоты будут продолжать звучать. Это производит большое впечатление даже на человека, лишенного музыкального слуха.

Нетрудно видеть, что время реверберации в помещении, где установилось диффузное звуковое поле, связано с коэффициентом поглощения стенок. Поскольку нас интересует время затухания звука, в расчет входит также и объем помещения. Мраморный купол и стены баптистерия дают средний коэффициент поглощения всего 0,03, поэтому значение T там велико.

Американский ученый Сэбин, исходя из картины непрерывного затухания звука, получил формулу

$$T = \frac{0,16 V}{S \bar{\alpha}},$$

где V — объем помещения. Если, впрочем, коэффициент поглощения велик, то затухание происходит не непрерывно, а «ступенями»: при каждом отражении у звука «отбирается» большая доля энергии. Чтобы учесть этот эффект, Эйринг модифицировал предыдущую формулу следующим образом:

$$T = \frac{0,16 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})},$$

а Кнудсен добавил в знаменатель формулы Сэбина слагаемое $4mV$, которое учитывает поглощение в воздухе (m — пространственный коэффициент затухания звука).

Любопытно, что, тогда как установившийся уровень реверберационного звука в большом помещении ниже, чем в малом, для времени реверберации характерна обратная зависимость. В малом помещении расстояние, пробегаемое звуковыми волнами от одного отражения до следующего, много меньше, и поэтому они поглощаются гораздо быстрее, чем в большом помещении, где то же число отражений происходит в течение значительно более длительного времени.

Само по себе время реверберации редко представляет непосредственный интерес для проблемы шума, но его измерение существенно помогает измерению полного поглощения в помещении. Установившийся уровень реверберации, который часто имеет важнейшее значение, зависит только от полного поглощения и от полной поверхности стенок помещения. В обычных условиях время реверберации определяют при помощи микрофона, усилителя и устройства, регистрирующего уровень; последнее снабжено самописцем, который вычерчивает график затухания звука на движущейся разграфленной бумажной ленте.

При проектировании залов, где требуется хорошая акустика, роль времени реверберации весьма велика, и, хотя в нашей книге эти аспекты акустики практически не затрагиваются, попытаемся все же вкратце рассмотреть этот вопрос. Что вообще подразумевают под термином «хорошая акустика зала»? Любителям музыки прекрасно известно, что одни концертные залы действительно лучше других, но мало кто знает, почему это так. Чтобы добиться хорошей акустики

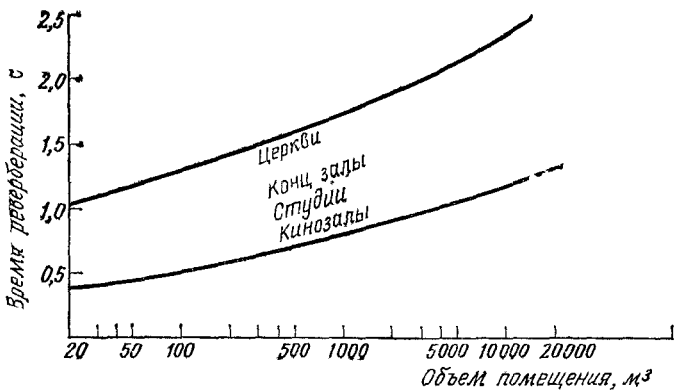


Рис. 44. Типичные значения времени реверберации.

зала, необходимо выполнить три совершенно независимых условия. Во-первых, время реверберации должно иметь нужное значение. Если оно слишком велико, в помещении возникнет излишняя реверберация: последовательные музыкальные ноты будут набегать одна на другую и результат будет такой же, как если пианист начнет играть на рояле, не снимая ноги с педали. Церковная музыка по своей структуре такова, что ее можно исполнять в помещениях с большим временем реверберации. Идеальным в этом отношении является так называемый строгий стиль, поскольку в нем изменения высоты звука малы, а когда высота изменяется, то продолжающееся звучание предыдущих нот повышает эффект. Но если бы в церкви зазвучал обычный симфонический оркестр, это вызвало бы какофонию звуков. С другой стороны, в Гайд-парке духовой оркестр звучит как-то жидко и несбалансированно, поскольку в открытом пространстве звуки не усиливаются реверберацией. На рис. 44 приведены некоторые данные по оптимальному времени реверберации на частоте 500 Гц для залов различного назначения. Залы, предназначенные только для выступления ораторов, должны обладать малым временем реверберации, чтобы речь звучала наиболее разборчиво.

Второе условие связано с тем, что восприятие звука может быть совершенно нарушено из-за наличия

в помещении эха. Но разве эхо — это не реверберация? Нет, различие между ними связано с некоторым характерным промежутком времени. Когда в помещении возникает какой-либо звук, то до слушателя прежде всего доходит прямой звук. Затем вступают первые отраженные волны и т. д. Эксперименты показали, что если первые отраженные волны приходят к слушателю не позже чем через 35 мс после прямого звука, то он слышит только один-единственный звук, причем так, как если бы звук приходил прямо от источника. Если же отраженный звук приходит позже чем через 50 мс после прямого, то он воспринимается как отдельное эхо. Так как скорость звука равна 344 м/с, то при различии длины пути прямого и отраженного звуков, превышающем 12 м, уже возникает эхо. Чтобы исправить положение, достаточно на участок поверхности, от которого отражается волна, нанести какой-либо звукопоглощающий материал.

Эхо другого типа могут создать резонансы, такие, как описанные ранее собственные колебания, возникающие при образовании стоячих волн между параллельными стенками. Это приводит к следующим последствиям: во-первых, некоторые музыкальные ноты излишне усиливаются и, во-вторых, время реверберации на этих частотах возрастает, в результате чего некоторые ноты продолжают звучать после того, как остальной звук уже замер.

И наконец, третье условие хорошей акустики зала — его геометрическая форма. Форма зала должна обеспечить не только отсутствие эха или резонансов, но и хорошую слышимость в любой его точке. Последнее особенно трудно, поскольку добиться этого можно только в том случае, если потолок и стены отражают звук во всех направлениях, причем отраженные волны должны доходить до любого места зала с запаздыванием не более чем на 35 мс. Здесь возможны серьезные трудности, так как для получения достаточного времени реверберации необходим большой объем зала, а следовательно, и большая высота помещения, но тогда отражения от высокого потолка могут приходиться слишком поздно. В таких случаях применяют подвесные отражатели звука, между которыми оставляют достаточно места, чтобы звук мог

проникать в пространство над ними. Множество современных залов устроено именно таким образом.

Зал «Роял Альберт-холл» пользовался дурной славой из-за эха, приходившего от его высокого куполообразного потолка. Причина заключалась не только в очень большой длине пути отраженной волны, но также и в том, что потолок оказывал фокусирующее действие, усливавшее эхо. Предпринимались попытки ускорить приход первых отражений путем сооружения навеса над оркестром, но эхо удалось устранить, лишь установив под куполом пористые звукопоглощающие «летающие блюдца».

Иногда оказывается очень трудно получить достаточно большое время реверберации в зале, особенно если объем помещения, приходящийся на одно место, мал. Это обусловлено тем, что и находящаяся в зале публика, и кресла также поглощают звук. Полное поглощение, приходящееся на каждого слушателя, равно 0,5 при 500 Гц, и, следовательно, публика обуславливает 50% полного поглощения в зале. Но современный любитель музыки в отличие от его предков уже не может удовлетвориться акустикой знаменитых старых залов. Современные туалеты настолько изменились, что поглощение, обусловленное публикой, значительно снизилось. Дамы в мини-юбках в этом отношении не могут конкурировать со своими прабабушками, облаченными в пышные туалеты, и поэтому теперь время реверберации залов, несомненно, увеличилось по сравнению с добрыми старыми временами.

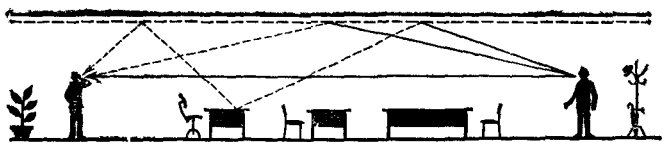
Часто приходится либо испытывать акустические характеристики зала, либо проводить в нем оркестровую репетицию в отсутствие публики. При этом, разумеется, увеличивается время реверберации и изменяются акустические свойства зала. Чтобы преодолеть это осложнение, на нижней стороне сидений делают перфорацию, превращая их таким образом в некое подобие резонаторов Гельмгольца; тогда при откинутых сиденьях эти резонаторы частично компенсируют отсутствие поглощения, обусловленного публикой. Полностью обитое незанятое кресло имеет коэффициент поглощения 0,3 при частоте 500 Гц. В Америке при пробном прослушивании в одном новом

зале был предпринят эксперимент с заменой слушателей болванками из микропористого полиуретана. Это мероприятие, кстати, избавило оркестр от возможной недоброжелательной реакции зала!

Обычно в тех случаях, когда необходимо увеличить поглощение на средних и низких звуковых частотах, применяют комбинации звукопоглощающих матов и резонаторов Гельмгольца, а поглощения низких частот добиваются при помощи мембранных и панельных резонаторов. Иногда, чтобы создать поглощение на низких частотах, используют также и большие резонаторы Гельмгольца.

До сих пор при расчетах реверберации мы рассматривали только помещения с диффузным звуковым полем; однако оно характерно далеко не для всякого помещения. Так, в прямоугольном помещении время реверберации может измениться из-за наличия «акустического» (звукопоглощающего) потолка. Звуковые волны, отражающиеся от пола и потолка, затухают гораздо скорее, чем волны, бегающие между хорошо отражающими стенами помещения. В результате звук сначала затухает быстро, а затем более медленно. В этих случаях обычная формула может привести к неправильной оценке абсолютного уровня реверберационного звука, создаваемого источником с данным уровнем мощности. Однако эта формула по-прежнему остается полезной при расчете относительного эффекта увеличения поглощения в помещении.

Но все полученные формулы вносят только путаницу, когда дело доходит до новейшего варианта в акустическом планировании помещений — помещений открытой планировки. Акустики только сейчас начинают использовать особенности поведения звука в условиях, когда горизонтальные размеры помещения во много, порядка десятка, раз превышают его высоту и когда как потолок, так и пол сильно поглощают звук. При проведении расчетов для диффузного звукового поля предполагается, что звук одинаково часто отражается от всех участков стенок и, следовательно, уровень реверберации почти постоянен по всему помещению. В помещении открытой планировки условия совсем другие и реверберационного поля в обычном смысле слова нет. В таком помещении прямой звук



Р и с. 45. Траектории звука в помещении с открытой планировкой.

по-прежнему убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Но при расчете реверберации можно не учитывать стен и считать, что помещение бесконечно длинное и широкое, а единственно существенный размер его — это высота. На рис. 45 показаны расположение источника и точки приема на типичном участке помещения открытой планировки. Наиболее сильными отраженными волнами будут те, которые отразились от пола или потолка только один раз. Пол почти всегда оказывается лучшим отражателем, чем потолок. Интенсивность отраженных волн определяется двумя обстоятельствами: длиной пути, в соответствии с законом обратных квадратов, и поглощением потолка и пола. Если эти величины известны, нетрудно найти интенсивность первых отраженных волн.

К первым отраженным волнам добавляются следующие по силе волны — те, которые испытали одно отражение от пола и одно от потолка; затем наступит очередь волн, отразившихся дважды от потолка и однократно от пола, и наоборот. В принципе число возможных путей волн бесконечно, но после нескольких отражений остаточным звуком уже можно пренебречь.

Как видно из рис. 45, путь прямого звука много короче пути, проходимого отраженными волнами, пока расстояние от источника не превосходит примерно 10 м. Это значит, что при удвоении прямого расстояния путь, который проходят отраженные волны, увеличивается меньше чем вдвое. До расстояний примерно 30 м от источника эффект поглощения звука потолком и полом остается более или менее постоянным. Что происходит на больших расстояниях, мы увидим позднее.

В итоге оказывается, что вблизи источника прямой звук преобладает над отраженным и последним

можно пренебрегать. Если уровень мощности источника известен, уровень звукового давления вблизи него можно рассчитать по закону обратных квадратов: при удвоении расстояния уровень падает на 6 дБ. Если средний коэффициент поглощения превышает примерно 0,5, то прямой звук преобладает повсюду. Впрочем, малое поглощение полом, который может быть заставлен различной мебелью, в большинстве случаев снижает средний коэффициент поглощения до 0,4 для частот выше 125 Гц и менее чем до 0,2 при более низких частотах. В таких случаях, начиная с некоторого расстояния, отраженные волны, уровень которых убывает при удвоении расстояния всего на 3 дБ, превзойдут по интенсивности прямой звук. Обычно это расстояние равно 3 м и соответствующий участок простирается примерно до 10 м, после чего длины путей прямых отраженных волн приближаются друг к другу и при удвоении расстояния уровень вновь убывает на 6 дБ.

Одно из важных следствий сказанного состоит в том, что в помещении открытой планировки субъективное ощущение реверберации отсутствует и весь звук кажется исходящим прямо из источника. Это объясняется тем, что все отраженные волны успевают прийти за время, меньшее критических 35 мс (о нем мы уже говорили выше); исключение составляют только дальние поля. В действительности, помещения открытой планировки содержат не один, а множество источников звука. Поэтому непосредственно рассчитать уровень окружающего шума не очень просто. Для этого необходимо знать расположение источников и статистическую оценку распределения и числа источников, действующих одновременно в каждый момент времени. В большинстве случаев можно пренебрегать реверберационным звуком дальнего поля, потому что первый тип реверберации, обусловленный ближними источниками звука, всегда оказывается преобладающим, если только в какой-то части помещения не будет значительно более шумно, чем в остальной.

Теперь отвлечемся от помещений открытой планировки, так как сейчас нас интересует только поведение звука, а не критерии шума и тому подобное. Позже мы снова вернемся к этому вопросу,

Итак, подведем некоторые итоги. Во-первых, установлено, что звук ведет себя в помещении так же, как и в открытом пространстве, только тогда, когда стенки помещения практически полностью поглощают звук. Во всех других случаях приходится иметь дело с двумя, если даже не с тремя типами шумовых полей. В обычных помещениях мы имеем дело с прямым звуком во всей области, где он является доминирующим. В этой области звуковое поле с точки зрения слушателя имеет направленный характер и подчиняется закону обратных квадратов. Впрочем, если в помещении с хорошо отражающими стенками находится много источников звука, то суммарное реверберационное поле может превосходить по интенсивности прямой звук вплоть до самых малых расстояний от источника или даже повсюду.

Далее, начиная с определенного расстояния от каждого источника, реверберационное поле становится преобладающим. В этой области звук окружает слушателя со всех сторон, и субъективный эффект получается совсем другим. Ввиду ненаправленности реверберационного звука попытки заэкранировать его, очевидно, бесполезны. Наконец, в помещениях открытой планировки, с их большими горизонтальными размерами и акустическим потолком, наиболее важные поля лежат между областями прямого звука и действительно реверберационного звука. Это — область непрямого звука.

До сих пор мы молчаливо предполагали, что источник звука находится внутри интересующего нас помещения. Этим, конечно, проблема не исчерпывается, и с этим согласится каждый, кому случалось вздрагивать, когда реактивный лайнер проносился над его домом. С каким звуковым полем мы имеем дело в этом случае? Ответ довольно прост. Во многих случаях шум от наружного источника проникает в помещение через стену. Мы уже видели, что стена, возбуждаемая с одной стороны падающими звуковыми волнами, сама становится источником звука по другую сторону. Поэтому, если звук проникнет в стену, она станет источником звука для помещения, а звуковая мощность этого источника будет зависеть от интенсивности проходящей волны и от площади

стены. Если выражать результаты в децибелах, то это значит, что стена площадью 10 м^2 излучит на 3 дБ больше звука, чем стена площадью 5 м^2 . На очень низких частотах стена колеблется так, что излучает плоские волны, подобные волнам, возбуждаемым при движении поршня в трубе; их интенсивность не зависит от расстояния. Впрочем, для большинства частот стена не колеблется как целое, и характер ее вибраций очень сложен. Во всех помещениях, за исключением сильно заглушенных, звуковое поле при проникании шума снаружи имеет преимущественно реверберационный характер.

Отсюда следует важное заключение: эффективность стен помещения как изоляторов звука зависит не только от величины звукоизоляции стен, но и от степени поглощения звука в помещении. Если звук проникает в помещение через сравнительно небольшую площадь, например через окно, прямой звук может оставаться значительным и на некотором расстоянии от окна, а поглощение в помещении скажется лишь на реверберационном звуке.

Рассмотрим теперь обратную ситуацию: предположим, что нас интересует уровень звукового давления в какой-то точке снаружи помещения. Как сказывается в таком случае наличие ограждения, которым служит помещение? Реверберационное поле, создаваемое отражениями от границ помещения, увеличивает эффективный уровень источника, но этот эффект уничтожается за счет звукоизоляции стен (ЗИ, дБ). В самом деле, отраженные волны увеличивают прямой звук внутри помещения в отношении $1/\bar{\alpha}$. Стены помещения можно рассматривать как новый источник звука с уровнем звуковой мощности

$$УЗМ_1 - ЗИ - 10 \lg \bar{\alpha}.$$

Уменьшение шума, обусловленное ограждением, следовательно, будет равно

$$ЗИ + 10 \lg \bar{\alpha} \text{ дБ.}$$

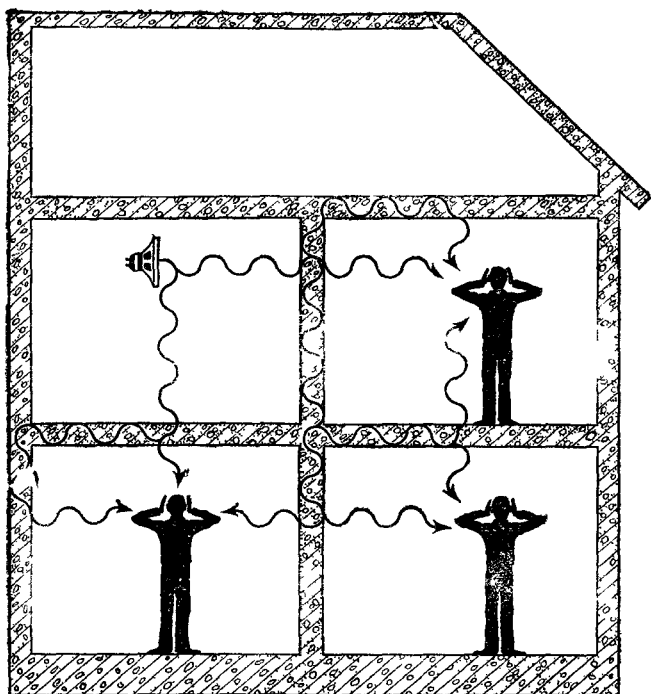
Это значит, что при малом $\bar{\alpha}$ звукоизоляция ограждения существенно снизится. В частности, при $\bar{\alpha} = 0,05$ снижение изолирующего действия ограждения уменьшается на целых 13 дБ.

О чем говорят эти цифры? Главный вывод — нель-

зя просто вычесть величину звукоизоляции стены в отдельности из исходного уровня звукового давления и надеяться, что получится уровень звука после постройки ограждения, окружающего источник со всех сторон либо отделяющего источник от места наблюдения. Необходимо принять в расчет площадь стены, а также поглощение внутри помещения. Нередко приходилось дорого платить за попытки заключить источник шума в замкнутый объем, так как при этом шум снаружи почти не снижался, ибо стенки объема внутри служили хорошими отражателями звука.

И еще одна неприятность. Все, что пока говорилось в этой главе, относится к звуку в воздухе. Мы умолчали о том, что, попав в какую-нибудь кирпичную стену, звук распространяется уже в твердом теле, хотя в дальнейшем он снова может выйти в воздух. А в твердых телах звук может распространяться на большие расстояния с очень малыми потерями энергии. Здесь звук не подчиняется закону обратных квадратов, потому что в стене он не расходится во все стороны в виде сферических волн, а канализируется внутри стены в виде плоских или изгибных волн. При этом возможны крайне нежелательные последствия. Звук в воздухе, падая на стену помещения, превращается в звук в твердом теле. Даже если в результате несогласования импедансов в стену войдет только 10% энергии воздушного звука, это приведет к уменьшению уровня всего на 10 дБ. Попав в твердую стену, звук не только будет выходить снова в воздух по другую сторону, но и распространится вдоль стены в остальную часть здания. В результате, если в здании имеются два или три смежных помещения, звук будет переходить из одного в другое не только прямо сквозь стену, но и путем распространения вдоль стен и перекрытия и дальнейшего переизлучения в воздух. На рис. 46 показаны пути, по которым звук может перейти из одного помещения в другие. К сожалению, бетон — один из наилучших твердых проводников звука, так как внутреннее поглощение звука в нем весьма мало: звук в жилом доме может пропутешествовать по бетону от верхнего этажа жилого дома до самого подвала.

Если звук, передающийся по твердому телу, иг-



Р и с 46 Боковые пути передачи звука между помещениями.

рает главную роль, то все полученные формулы оказываются бесполезными и величину звукоизоляции стен нельзя использовать непосредственно для расчета уровней звука. Худшие случаи боковой передачи звука — это передача между смежными помещениями. Тогда теоретическое значение для изоляции стены приведет к слишком оптимистическим выводам; в этом случае следует руководствоваться значениями, получаемыми при испытаниях разных типов стен на месте, а не данными лабораторных измерений. Закон масс заведомо неприменим в подобных случаях. Разумеется, звук, распространяющийся в твердом теле, может и возникать в этом теле, а не обязательно переходить в него из воздуха. Так происходит, когда механизмы крепятся непосредственно к твердому основанию, а также когда мы сами ходим по полу. В гл 13 мы рассмотрим методы борьбы и с этим шумом.

Насколько тихо должно быть? Комфорт, обязанности работодателя и законодательство

Слово «обесшумливание» вводит в заблуждение точно так же, как и слово «звуконепроницаемость». Оба термина вызывают представление о полном исключении или уничтожении шума, тогда как это почти никогда невозможно, да и не нужно. В самом деле, ведь независимо от начального уровня шума, для того чтобы довести звуковое давление до нуля, пришлось бы снизить уровень на бесконечное число децибел. Встречаются трудные задания, но вряд ли такие требования поставит даже самый далекий от практики инженер или проектировщик!

К чему же в таком случае следует стремиться? Какой шум уже окажет раздражающее действие? Какой шум можно еще считать безопасным? А что требует закон? Если мы сумеем ответить на все эти вопросы, мы сможем ответить и на главный вопрос: во что обойдется борьба с шумом? Любая борьба с шумом стоит денег, но производимые затраты никак нельзя считать «помещением капитала», потому что «доходов» с затраченного капитала здесь не получишь. Чаще всего борьба с шумом — это полумеры, которые администрация вынуждена осуществлять под давлением протестующих соседей или подвергающихся чрезмерному шуму рабочих своего предприятия. «Переобесшумливание» — это выбрасывание денег на помойку. Одна из наиболее важных проблем, стоящих перед инженерами акустиком, — найти правильный компромисс между эффективностью принимаемых мер и необходимыми расходами. Однако «недообесшумливание» столь же расточительно, потому что недостаточные мероприятия, которые в дальнейшем потребуют дополнительных работ, в итоге обойдутся

значительно дороже, чем своевременное улучшение акустической обстановки. К счастью, в некоторых случаях борьбу с шумом можно рассматривать как выгодное помещение капитала, поскольку в результате увеличивается производительность труда. Вряд ли можно сомневаться в том, что работа служащих учреждения станет более эффективной, если их из шумного помещения перевести в другое, хорошо спроектированное с акустической точки зрения. Так, в современных служебных помещениях, в самом проекте которых комплексно решены вопросы акустической обстановки, удастся значительно повысить производительность работы по сравнению с обычными помещениями открытой планировки. По некоторым данным, при уменьшении шума на заводах снижается число несчастных случаев и число невыходов на работу, в результате чего также растет производительность труда. Несколько лет назад в одном фотоателье был проведен тщательно контролируемый эксперимент с целью выяснить, насколько сократится число обрывов лент, вызванных ошибками оператора, управляющего механизмами, при уменьшении окружающего шума. Удалось установить, что при работе в акустически обработанных помещениях скорость работы не изменилась по сравнению с необработанными, но число обрывов лент снизилось в пять раз. Известен случай, когда производительность труда ткачей выросла на 12% после того, как им были выданы ушные заглушки.

Впрочем, борьба с шумом в первую очередь вызывается не заботой о производительности труда, а необходимостью перестать мешать кому-то, и очень часто это относится к шуму в жилых помещениях. Что же следует считать раздражающим шумом, если речь идет не о каком-нибудь невротике, а просто о человеке с нормальным слухом?

Почти во всех случаях наиболее важен не абсолютный уровень шума, а общий «шумовой климат». Как однажды было сказано на судебном процессе, то, что считается неудобством в Бельграв-сквере, не обязательно следует расценивать так же и в Бермондси! Хотя это замечание и может показаться сделанным с позиции представителей «правого крыла» в английском парламенте, оно тем не менее справедливо с аку-

стической точки зрения, которую не следует отождествлять с социальной. Дело не в том, что те, кто вынужден тратить огромные суммы на выплату налогов и аренды за свои дома, в праве требовать немного спокойствия и тишины; главное в том, что «акустические климаты» Бельграв-сквера и Бермондси совершенно различны.

Действительно, шум нескольких вентиляторов на птицефабрике может вырасти в грандиозную проблему в глухой деревушке, тогда как в пригородном жилом районе он будет почти незаметен. Какая-нибудь чугунолитейная мастерская создает в прилегающем районе шумовое загрязнение, которое было бы нетерпимо в большинстве других мест. Но жители этого района переносят его легко потому, что оно не выделяется на общем фоне, создаваемом еще и другими шумными производствами; кроме того, эти люди зарабатывают себе на жизнь именно на данных предприятиях. Шахтеры не обращают внимания на шлак и отвалы шлака, которые у них всегда перед глазами, потому что с созданием этих отвалов связаны их заработки. Но попробуйте набросать кучу шлака, например, в Уелвин-Гарден-сити и посмотрите, что из этого получится!

Нельзя поэтому делать утверждения вроде «допустимый уровень шума в спальне составляет 35 дБА». В очень многих случаях это излишне низкий уровень. Кроме того, один вид шума с уровнем 35 дБА может оказаться гораздо более раздражающим, чем какой-то другой шум того же уровня. В этой книге о шуме говорилось уже достаточно, чтобы понять, что два совершенно различных шума могут измеряться одним и тем же числом дБА. Простейший пример — сравнение шума, состоящего из нескольких чистых тонов, с шумом, не имеющим тонального характера, например шумом ветра. Типичный шумовой загрязнитель — градирня. Зачастую это деревянная башня с большим осевым вентилятором наверху; воздух охлаждается при просасывании его через завесу падающей воды. Обычно вентиляторы вращаются так медленно, что тон с частотой, равной частоте прохождения лопастей, не слышен; остальной шум обусловлен аэродинамическими причинами и падающей водой, и, хотя он

может иметь значительную интенсивность на низких частотах, дискретных тональных компонент в нем нет. Возьмем теперь, скажем, вытяжной вентилятор какого-либо здания; он вращается в несколько раз быстрее вентилятора градирни, и значительная часть энергии его шума сосредоточена на одном или двух дискретных тонах. Хотя уровень шума, обусловленный каждым из вентиляторов, у расположенного неподалеку дома может оказаться одинаковым, равным, например, 40 дБ, вытяжной вентилятор, по всей вероятности, создаст проблему нежелательного шума, тогда как вентилятор градирни не только никакой проблемы не создаст, но, возможно, даже окажет благоприятное действие.

Благоприятное? Каким образом? Дело в том, что проблему шума иногда можно решить не путем снижения, а путем добавления звука. Если на территории фабрики, где расположена градирня, все время ходят, стучат и хлопают дверьми, то даже при условии, что уровень такого шума на другой стороне улицы и невелик, он может сильно раздражать. Наличие шумящей градирни обеспечит то, что называют маскировкой. Сам по себе шум градирни не имеет раздражающего характера, а ввиду неспособности уха воспринимать некоторые звуки в присутствии некоторых других — мы говорили об этом в гл. 5 — раздражающий характер стуков и хлопанья может оказаться подавленным, да еще вместе с шумом некоторых других неприятно «поющих» вентиляторов, если их громкость не слишком велика.

Что же нужно делать, чтобы оценить данную шумовую проблему? Как выяснить, каково раздражающее действие шума? Если в нашем распоряжении есть только простой шумомер, то лучше всего обратиться к существующему Британскому стандарту № 4142 от 1967 г., озаглавленному «Метод расчета промышленного шума, действующего на территориях, занятых совместно под жилые кварталы и промышленные предприятия». Хотя Международная организация по стандартизации¹, возможно, предложит зна-

¹ Эта организация часто упоминается в литературе под сокращенным названием ИСО (ISO — International Standards Organisation). — *Прим. ред.*

чения, меньшие тех, что предусмотрены Британским стандартом, последний в ряде отношений весьма полезен.

Так, этот стандарт предусматривает два типа ситуации: случаи, когда мешающий шум можно временно прекратить, чтобы измерить фоновый уровень шума, и случаи, когда этого сделать нельзя. Уровень мешающего шума измеряют в дБА в каком-либо месте снаружи здания (на высоте 1,2 м над уровнем грунта и на расстоянии по крайней мере 3,6 м от стен), от жильцов которого исходят или могут исходить жалобы. Важно проследить, чтобы шум, обусловленный ветром, электрической наводкой или другими посторонними причинами, был исключен; даже при наличии ветровой защиты микрофона нежелательно производить измерения при сколько-нибудь сильном ветре. Если показания прибора очень малы, следует помнить, что каждая усилительная цепь его характеризуется определенным собственным шумом, который определяет нижнюю границу динамического диапазона шумомера.

Во многих случаях шум не постоянен: его уровень может сильно флуктуировать. Тогда нужно стараться произвести два отсчета: первый — среднее (на глаз) положение колеблющейся стрелки прибора (эту величину следует определять, если колебания остаются в пределах 10 дБА), второй — среднемаксимальный уровень, до которого стрелка отбрасывается время от времени.

Измерения необходимо проводить в течение достаточно длительного времени, чтобы оценки частоты встречаемости и длительности обоих уровней — их обозначают L_1 и L_2 — были надежны.

Далее нужно учитывать характер шума. Если шум нерегулярен и имеет импульсный характер, как, например, удары и стуки, о которых шла речь выше, то, чтобы учесть добавочное раздражающее действие, к измеренным значениям уровней следует добавить 5 дБА. То же необходимо сделать и при наличии в шуме определенной различимой непрерывной ноты, даже если она представляет собой не чистый тон, а только обладает определенной высотой. Впрочем, это не единственные характеристики шума, влияющие на

степень его раздражающего действия. Перемежающийся шум считается менее раздражающим, чем непрерывный, хотя первый при регулярных включениях и выключениях мешает сильнее, потому что привлекает к себе внимание при каждом включении или выключении. Нередко мы замечаем остановку часов или прекращение шума системы отопления¹, хотя до этого мы никак не воспринимали их привычного шума: внимание было привлечено именно внезапным прекращением шума.

Если, впрочем, доля времени, в течение которого шум отсутствует, превосходит несколько процентов от полного времени, суммарное раздражение от шума снижается. Типичный случай (правда, он не предусматривается Британским стандартом) — это шум самолетов. Любой человек, проживающий неподалеку от лондонского аэропорта Хитроу, согласится с тем, что жизнь на таком же расстоянии от аэропорта Гэткин, где перерывы между полетами значительно больше, была бы много приятнее. Поэтому, чтобы учесть перемежающийся характер шума, в измеренный уровень вносят некоторую поправку. В стандартах приводятся графики для расчетов поправок при типичных режимах следования полетов, при той или иной длительности шума и при том или ином числе полетов в течение 8-часовых периодов для ночи и для остальной части суток.

После выполнения указанных измерений следует попытаться выключить источник изучаемого шума, чтобы можно было измерить уровень шумового фона. Фон также может оказаться непостоянным, и поэтому необходимо следить за положением стрелки и фиксировать типичные низкие значения уровня, игнорируя отдельные выбросы. Впрочем, такое мероприятие вряд ли удастся провести в случае, например, газового завода — прекратить его работу под предлогом необходимости измерить фоновый шум!

На этом работа на месте заканчивается, и остаются только расчеты. Вычисляют величину «исправленного критерия»: величина основного критерия берет-

¹ Речь идет, по-видимому, о квартирных газовых отопительных системах. — *Прим. ред.*

ся равной 50 дБА; далее, если шумящее предприятие появилось уже несколько лет назад, но не типично для района, добавляют 5 дБА; для давно работающих предприятий, типичных для данного района, добавляют 10 дБА. Литейная, о которой речь шла выше, попадет в последнюю категорию. Разумеется, «предприятием» считается любое промышленное заведение или установка. Для только что организованных предприятий, как и для предприятий, где в результате реконструкции можно ожидать повышения уровня шума или где организовано новое производство, никакой добавки не делают.

Затем вносят поправки, учитывающие шумовой климат района. Для сельских местностей вычитают 5 дБА; для пригородных жилых кварталов с малым уличным движением поправка не вносится. Для городских жилых кварталов добавляется 5 дБА и т. д., 20 дБА добавляют для преимущественно промышленного района с малым числом жилых домов. Кроме того, 5 дБА прибавляют в случае, если шум производится только в рабочее время, и вычитают, если шум производится ночью. Наконец, к измеренному уровню добавляют 5 дБА, если шум создается только зимой, поскольку предполагается, что в это время года окна в домах большей частью закрыты и мало кто проводит время, сидя в своем садике.

Теперь мы можем подойти к нормированию шума, для чего, собственно, и предназначен этот стандарт. Прежде всего исправленный уровень фонового шума сравнивают с исправленным критерием. Это дает представление о том, насколько шумовой климат характерен для данных условий. Если исправленный уровень фонового шума превосходит исправленный критерий, то есть если данный район необычно шумный, но избыточный шум не превосходит 10 дБА, то со стороны жителей района возможны жалобы в случае, если какой-либо из двух исправленных уровней шума (обозначим их соответственно L'_1 и L'_2) превосходит исправленный критерий на 10 дБА и более. Если ситуация обратная и территория малозумная, жалобы возможны в случаях, когда L'_1 или L'_2 превосходят уровень фонового шума на 10 дБА и более. Если значения фонового шума получить не удалось,

то приходится исходить только из исправленного критерия; когда либо L'_1 , либо L'_2 превышают его на 10 дБА и более, протесты со стороны жителей района вполне вероятны. В противном случае жалоб вряд ли можно ожидать.

Во всех случаях превышение на 5 дБА не считается существенным, но, разумеется, если допускать лишние 5 дБА для шума каждого из предприятий, то в результате разница в оценке фонового шума может получиться значительной. Поэтому там, где измерить уровень фона не удастся, но он явно аномально высок или аномально низок, лучше не слишком полагаться только на исправленный критерий.

Если оказалось, что шум придется снижать, то измерения уровня в дБА становятся бесполезными, и, чтобы выяснить, на каких частотах необходимо снизить уровень, следует перейти к частотному анализу шума, используя октавные, полуоктавные, третьоктавные и даже более узкополосные фильтры. В Британском стандарте приводится график, главное достоинство которого состоит в легкости его построения. Он представляет собой набор сильно упрощенных кривых равной громкости; на него наносят результаты октавного анализа шума, и это позволяет выяснить, в какой из полос лежат наиболее нежелательные компоненты звука.

Значения, получаемые по стандарту, несомненно, завышены, но тем не менее ими широко пользуются для оценки вероятности поступления жалоб, а также для установления критериев. Но нередко им пользуются неправильно. Вся процедура выработана единственно для определения, какова вероятность того, что данный шум окажется приемлемым для той или иной группы населения. Стандарт не устанавливает разрешенных уровней. К сожалению, все чаще встречаются случаи, когда после оценки шума в соответствии со стандартом он не был сочтен чрезмерным, а измерявшие шум — кто бы они ни были — заявляли бедным жертвам: «Согласно Британскому стандарту № 4142 от 1967 г., вы не должны жаловаться!» Конечно, это вздор: стандарт — это руководство для лиц, вырабатывающих критерии и занимающихся борьбой с шумом, но только в том отношении, что он помогает

предвидеть, какой шум окажется приемлемым, а какой — нет. Хотя при случае на стандарт можно ссылаться при разборе дела в суде, его нельзя рассматривать как закон, устанавливающий, имеет или нет квартиросъемщик право жаловаться на недопустимость шума.

Этот стандарт далеко не единственное пособие при оценке шумов, и за последние годы выработаны разнообразные системы оценок. Можно было бы посвятить целый том вопросам, касающимся акустических единиц и методов оценки шума. ИСО опубликовала под шифром R1996 список рекомендаций, аналогичный Британскому стандарту, с той лишь разницей, что в нем рекомендуется использовать шкалу $L_{ЭКВ}$ для случаев, когда шум меняется в значительных пределах. Рекомендации ИСО не дают общих критериев, но в частных случаях в них предлагается в качестве критерия использовать уровень фонового шума, определенный как L_{95} , который практически обычно очень близок к L_{90} . Затем рекомендуется рассчитывать величину уровня для нормируемого шума либо как $L_{ЭКВ}$, либо способом, аналогичным применяемому Британским стандартом; полученное исправленное значение предлагается сравнивать с уровнем фона. Если используется величина $L_{ЭКВ}$, то единственная возможная коррекция сводится к добавке +5 дБА при импульсном характере шума. Наконец, превышение исправленного уровня шума над фоном связывается с ожидаемой реакцией жителей района следующим образом:

Превышение уровня шума над критерием шума, дБА	Ожидаемая реакция
0	Никакой реакции
5	Отдельные жалобы
10	Многочисленные жалобы
15	Угроза организованных протестов
20	Активные протесты

ИСО дает также рекомендации по критериям допустимого шума для помещений различного назначения. Первоначально в основу предложений ИСО были положены не уровни в дБА, а графики нормировочных кривых для оценки шума, которые и сейчас

остаются весьма полезными (как и аналогичные кривые критериев шума, применяемые в США). Они подобны идеализированным кривым равной громкости. Данному шуму приписывают нормировочный индекс, нанося результаты его октавного анализа на график нормировочных кривых и устанавливая наибольший номер нормировочной кривой, которую октавный спектр шума пересекает в одной или нескольких октавных полосах. Использование этих кривых гораздо проще, чем сравнение уровней, выраженных в дБА, поскольку возможно почти бесконечное множество комбинаций уровней в октавных полосах, дающих в сумме одно и то же значение дБА. Впрочем, для рассматриваемой нами сейчас цели представление уровней в дБА более чем удовлетворительно.

В заключительном отчете Комитета по проблеме шума даны некоторые предварительные рекомендации по уровням шума для жилых комнат и спален (критерии Британского стандарта относятся к уровням шума вне зданий). В названном отчете допустимые уровни, которые могут быть превышены не более чем в течение 10% времени, предварительно оцениваются следующим образом:

Местоположение района	Уровень, дБА	
	днем	ночью
Сельский район	40	30
Пригородные районы, расположенные вдали от основных магистралей	45	35
Оживленные городские районы	50	35

При составлении этих оценок учитывалось, что для удовлетворения таких требований будет необходимо снижать фактические уровни шума на 5 дБА и более.

Конечно, транспортный шум и шум предприятий не единственные источники беспокойства жильцов; могут попасться соседи, которые совершенно непреднамеренно сильно мешают вам просто потому, что из их квартиры будет доноситься шум воды, спускаемой в туалете, или даже шум шагов. Станция исследования жилых домов в Уотфорде провела ряд обследований, в результате которых мы имеем систему оце-

нок звукоизоляции межквартирных стен и перекрытий. Оценка производится по трем категориям: категория изоляции капитальной стены, категория изоляции I и категория изоляции II. Категория II дает примерно на 5 дБ меньшую изоляцию, чем категория I, а категория капитальной стены предусматривает ту же изоляцию, что и категория I, но с улучшением в низкочастотной области (на 4 дБ при 100 Гц). Кирпичная стена толщиной 230 мм, разделяющая две квартиры, обычно соответствует категории капитальной стены.

Вспомнив, что, согласно закону масс, уменьшение массы перегородки вдвое вызывает снижение изоляции на 5 дБ, приходим к заключению, что для выполнения требования категории II можно удовлетвориться гораздо более легкой перегородкой. Это относится и к перекрытиям: 120-миллиметровый бетонный пол, податливый мат и плавающий настил вполне отвечают требованиям категории I; то же можно сказать и о бетонной плите толщиной 200 мм. О применении категории капитальной стены нечего и говорить. Для того чтобы шум мало раздражал, стены, разделяющие квартиры или части дома с отдельными выходами, а также отделяющие спальни и общие комнаты от коридоров и холлов, должны удовлетворять требованиям категории I. При перегородках категории II шум будет мешать значительно сильнее, но, вероятно, более чем половине жильцов он не причинит серьезного беспокойства.

Таким образом, мы располагаем руководящими предписаниями для оценки шума дома. Но как обстоит дело с шумом на работе?

В гл. 5 мы подробно рассмотрели вопросы, связанные с повреждением слуха шумом; однако недостаточно просто убедиться, что сотрудники предприятия не находятся в опасности, хотя с этого и нужно начинать. В настоящее время 90 дБА считают предельным значением эквивалентного равномерного шума, допустимого на рабочем месте. В гл. 5 показано, что практически оценить риск повреждения слуха весьма сложная задача; в ряде случаев, например при достаточно длительных периодах отсутствия шума, уровни выше 90 дБА также оказываются

безопасными. Тем не менее весьма возможно, что в дальнейшем эта величина будет узаконена. Здесь снова следует иметь в виду, что два различных шума, из которых один представляет большую опасность, чем другой, могут иметь одинаковый уровень в дБА. В таких случаях возникает необходимость в частотном анализе шума и в использовании нормировочных кривых шума; однако любой частотный анализатор стоит не менее 200 фунтов стерлингов и всякий предпочтет пользоваться прибором, который обойдется в четверть этой цены. Появление временного сдвига порога (см. гл. 5) слышимости у лиц, которые бывают на шумных участках лишь от случая к случаю, но не работают здесь постоянно, может служить сигналом о риске повреждения слуха у постоянных работников; в этом случае требуется тщательно исследовать ситуацию и при необходимости пригласить специалистов.

Следующим пунктом в порядке очередности идет производительность труда и общий «шумовой климат» на предприятии или в учреждении. Снова отметим, что для персонала предприятий 90 дБА — предел, выше которого производительность труда заметно ухудшается. По-видимому, не случайно эта цифра совпадает с уровнем, соответствующим риску повреждения слуха. При этом подразумевается, что речь идет о работе, связанной с управлением механизмами или с наблюдением за ними. Разумеется, по мере необходимости повышения внимания и сосредоточенности растет и потребность в снижении шума: так, я бы не смог написать эту книгу при уровне шума 90 дБА, но мне повезло, и сейчас, когда я пишу эти строки, взглядывая на шумомер, я вижу на нем уровень всего в 32 дБА.

Начнем с верхней части шкалы. Уровень 90 дБА допустим в тяжелой промышленности или при производственных процессах такой шумности, что вследствие больших затрат на снижение уровня нельзя требовать большего, чем просто обеспечения безопасности; уровень 80—85 дБА можно считать границей, приемлемой для легкой промышленности; 75 дБА — верхний предел шума для сложных работ, например сборки электронного оборудования. Во многих учреждениях обычного типа допустим уровень шума

60—65 дБА, но это, как правило, вызывает жалобы, поэтому уровень 55 дБА следует считать более приемлемым. В небольших учреждениях стремятся довести уровень шума до 45—50 дБА, а для кабинетов руководящих работников удовлетворительно значение 35—40 дБА.

Шум, соответствующий указанным значениям уровней, должен быть лишен раздражающих особенностей вроде импульсного характера или присутствия дискретных тонов. В первую очередь это относится к нижней части шкалы уровней. При наличии же этих нежелательных характеристик уровень мешающего шума следует снизить на 5 дБА по сравнению с обычными значениями. Если источник звука, например пишущая машинка, создает импульсный шум, то лучше всего попытаться повысить уровень фона, который будет действовать как маскировка, частично уменьшая раздражающее действие стука. В обычном учреждении со средним уровнем фонового шума 50 дБА, но при наличии импульсных шумов от пишущих машинок, стука картотечных ящиков, звука роняемых на пол предметов шумовой климат может оказаться хуже, чем в подобном же учреждении с уровнем фонового шума 55—60 дБА, обусловленным, скажем, шумом вентиляционной системы, не имеющим раздражающего характера.

Идеальным условием в конторском помещении следует считать очень низкий уровень реверберации, что достигается установкой акустического потолка и использованием ковровых покрытий на полу; уменьшение же общего уровня фона можно компенсировать маскировкой, создаваемой, например, шумом вентиляционной системы. Иногда оказывалось даже необходимым искусственно создавать маскирующий шум путем проигрывания магнитофонных записей либо с помощью электронного генератора шума. Такие мероприятия особенно важны в больших конторских помещениях открытой планировки, где одновременно в одном помещении работает до 200 человек.

До сих пор мы говорили только о руководящих указаниях и рекомендациях. А существуют ли законы, относящиеся к шуму? Как ни удивительно, закон мог вмешиваться в вопросы шумности уже с давних пор,

задолго до того, как был задуман Закон о снижении шума. Дело в том, что, говоря юридическим языком, создание шума можно расценивать как действие, приводящее к нарушению покоя граждан, а это действие, согласно закону, может рассматриваться в известной мере как преступление. Существуют разные типы нарушения покоя граждан: нарушение общественного порядка, наказуемое нарушение общественного порядка и нарушение покоя частного лица; эти типы совершенно различны. Точных определений каждого из них не существует, но для практических целей можно пользоваться следующими:

1. Нарушение общественного порядка — создание беспокойства или опасности для населения.

2. Наказуемое нарушение общественного порядка — нарушение, преследуемое по закону.

3. Нарушение покоя частного лица — помеха другому лицу в пользовании им своим земельным участком.

Первые два типа нарушений относятся к разряду преступлений, третье — это гражданское правонарушение, по поводу которого пострадавший может обратиться в гражданский суд. Начать дело по поводу нарушения общественного порядка может только генеральный атторней¹, и, хотя он может самостоятельно предать суду нарушителя, он обычно обращается в Высокий суд² за соответствующим предписанием.

Создание шума подходит под все три названных типа нарушений. Поскольку нарушение общественного порядка есть преступление, а нарушение покоя частного лица таковым не является, важно установить различие между ними. Судья апелляционного суда Деннинг сказал: «Классическое определение различия заключается в том, что нарушение порядка затрагивает интересы подданных Ее Величества вообще, а нарушение покоя частного лица затрагивает интересы только отдельных лиц. Но это не очень помогает разобраться в существе проблемы. На во-

¹ Высший чиновник органов юстиции в Англии, являющийся членом кабинета министров. — *Прим. ред.*

² Суд первой инстанции по гражданским делам с юрисдикцией на территории всей Великобритании. — *Прим. ред.*

прос, какое число индивидуумов следует уже считать подданными Ее Величества вообще, ответить не легче, чем на вопрос, какой величины группа граждан образует толпу... Поэтому я уклоняюсь от ответа на этот вопрос... Я предпочитаю обратиться к причинам явления и сказать, что под нарушением общественного порядка нужно понимать такое нарушение покоя граждан, которое имеет столь широкое распространение и по своему действию носит столь огульный характер, что было бы неразумно ожидать, что отдельное лицо предприимет самостоятельно судебное дело и добьется прекращения нарушений, и поэтому такие меры должны быть осуществлены всем обществом».

Для возбуждения судебного дела необходимо, чтобы наличествовал ущерб, хотя бы он заключался только в нарушении благоприятных условий проживания истца у себя в доме. Когда нарушение связано с шумом, за основу принимается помеха личному комфорту граждан. Она должна быть существенной.

Что касается наказуемого нарушения общественного порядка, то, согласно Закону о снижении шума от 1960 г., оно относится к компетенции Закона 1936 г. о народном здравоохранении. Впрочем Закон о снижении шума теперь перекрывается Законом о контроле над загрязнением окружающей среды от 1974 г., который, введя некоторые новые радикальные положения, расширяет права местных властей в борьбе с наказуемыми нарушениями общественного порядка. Так, в обязанность местных властей входит инспектирование подведомственного им района с целью обнаружения случаев, когда необходимо принять меры против шумового загрязнения; если после командировки на место нарушения официального лица — инспектора здравоохранения или чиновника Управления по охране окружающей среды — власти убеждаются в существовании шумового загрязнения, они должны вручить виновнику официальное постановление. Последнее может просто содержать требование о снижении шума либо указать мероприятия, которые для этой цели должны быть осуществлены. Невыполнение требований рассматривается как правонарушение; тогда дело передается мировому судье, который возбуждает судебное дело против лица, получившего

предупреждение. Местные власти теперь более не должны ожидать официального предписания от мирового судьи. Дело может быть начато в мировом суде, несмотря на намерение ответчика оспорить постановление, на что дается срок в 21 день. В качестве наказания налагается штраф в размере 200 фунтов стерлингов за первое правонарушение (за последующие — 400 фунтов) плюс 50 фунтов за каждый день, в течение которого нарушение продолжалось. Одно из положений, отличающих новый закон о снижении шума от старого, гласит, что каждый квартиросъемщик имеет право приносить жалобу непосредственно в мировой суд, если он испытывает неудобство от шума, хотя суд и не обязан на основе этого возбудить дело. Другое изменение заключается в том, что национализированные отрасли промышленности, несколько мрачно именуемые на юридическом языке «установленными по закону гробовщиками¹», не освобождаются более от ответственности по суду за наказуемое нарушение общественного порядка.

А каковы средства защиты у ответчика? Что можно предпринять, совершив правонарушение и оказавшись под судом? Правильной линией защиты будет попытка показать, что инкриминируемое действие вообще не является нарушением покоя граждан, либо, если и является, принадлежит к другому типу: так, при обвинении в совершении акта нарушения покоя граждан можно в качестве оправдания доказывать, что его следует расценивать только как нарушение покоя частного лица. В случае обвинения в совершении наказуемого нарушения общественного порядка можно мотивировать защиту тем, что были предприняты все практически возможные меры для предотвращения шума и противодействия его влиянию. Можно выдвинуть еще один-другой оправдательный аргумент, однако, когда речь идет о нарушении покоя, все они будут малоуместны. Один из таких аргументов — это утверждение, что положение дел нельзя исправить никакими возможными мерами.

Существуют два основных способа борьбы с нарушением покоя граждан, один из которых, как ни

¹ Игра слов: по-английски «undertaker» значит и «предприниматель», и «гробовщик». — *Прим. ред.*

странно, не связан с судебным разбирательством. Ставший жертвой нарушения покоя может взять закон в собственные руки и осуществить свое право на борьбу с нарушением. Так, если сосед нарушает ваш покой, например установив шумный вентилятор в стене дома, вы можете просто войти на его территорию и заклинить вентилятор, если его шум действительно был невыносим. Однако подобное действие никак нельзя рекомендовать, ибо после него вы безусловно потеряете право возбудить дело в суде.

Обычно идут другим путем: следует получить соответствующее судебное предписание, запрещающее совершать или продолжать неправомерное действие или, наоборот, бездействие. Невыполнение такого решения приводит к тюремному заключению. Предписание не выдается, если причиняемый ущерб несуществен или если оказывается, что это предписание имеет притесняющий характер для ответчика. Зачастую подобное предписание сопровождается присуждением компенсации за убытки; в случаях, когда ходатайство о выдаче постановления сопровождалось просьбой о возмещении убытков, оно может быть выдано судом графства; при этом нет необходимости обращаться в Высокий суд.

Закон о контроле над загрязнением окружающей среды не только сделал более жесткими законы о шуме как наказуемом нарушении общественного порядка, но и специально поставил вопрос о шумах на строительстве. Руководствуясь Британским кодексом правил по строительным шумам, местные власти уже на начальном этапе могут выступить с предупреждением, в котором будет установлен не только предельный уровень шума, но и указаны ограничения, связанные с применением тех или иных видов механизмов, и ограничения на время дня, в течение которого могут производиться работы. Подрядчик имеет право обжаловать данное предупреждение в мировом суде, причем наилучшим тактическим ходом в этом случае также будет доказательство того, что он уже принял все возможные меры по уменьшению шума.

В отличие от традиционной практики использования законов по борьбе с теми или иными частными нарушениями Закон о контроле над загрязнением

окружающей среды содержит одно радикально новое положение. Это концепция зон снижения шума, позволяющая местным властям, ведающим участками территории, на которых обшей шумовой фон аномально высок в результате действия большого числа предприятий, предупредить ухудшение ситуации, с тем чтобы в дальнейшем добиться улучшения положения. Власти производят измерение шума, создаваемого каждым из предприятий на территории, объявленной зоной снижения шума. После этого всякое превышение зарегистрированного уровня будет считаться правонарушением. Более того, власти имеют право принять постановление о снижении шума, если уменьшение зарегистрированных уровней представляется осуществимым. При этом не требуется устанавливать факт нарушения покоя граждан. Предприятие получает срок, по меньшей мере в шесть месяцев, для выполнения требований о снижении шума и, разумеется, имеет право апеллировать к мировому суду. (На мой взгляд, мировым судьям не мешало бы обзавестись этой книжкой!)

Наконец, помимо подтверждения законодательства, касающегося таких вопросов, как использование громкоговорителей на улицах, закон дает министру право ограничивать уровень шума, создаваемого механизмами, расположенными вне предприятий, например на строительных площадках. Настоящий закон не распространяется на шум моторизованного транспорта, относительно которого действуют правила от 1969 г. о производстве и эксплуатации моторизованных средств транспорта. Эти правила устанавливают предельные значения для шума, создаваемого вновь выпускаемыми средствами транспорта: легковыми и грузовыми автомобилями и мотоциклами, — а также несколько повышенные предельные значения для уже используемых средств транспорта. К сожалению, полиция не имеет ни времени, ни охоты заниматься проведением в жизнь этих правил, так что в суде возбуждается ничтожно малое число дел о превышении уровня шума. Правила оказались полезными в том отношении, что они побудили изготовителей устанавливать более эффективные системы выхлопа на выпускаемых ими автомобилях. Теперь следовало бы

предпринять и новые шаги к поижению допустимых уровней шума, однако в этом отношении Англия зависит от Общего рынка.

На транспортные шумы распространяется, впрочем, Закон о государственной компенсации от 1973 г., согласно которому управления дорог обязаны оплачивать стоимость звукоизоляции домов от шума, возникающего при введении в эксплуатацию новых и улучшенных дорог. Критерий, устанавливающий, изолированы ли дома от транспортного шума или нет, определяется тем, превышает ли значение L_{10} уровень 68 дБА при усреднении шума за 18 ч (с 06.00 до 24.00).

Существуют и другие правила, предусматривающие выплаты субсидий для улучшения звукоизоляции лицам, проживающим вблизи аэропортов типа Хитроу, Гэтвик и Манчестерского. В этих случаях оплачиваемые мероприятия по звукоизоляции заключаются в установке звукоизолирующих двойных оконных рам и вентиляционных устройств, которые проектируются таким образом, что пропускают наружный воздух, но снижают уровень шума, проникающего в помещение снаружи.

Наибольший пробел в законодательстве о шумах — область производственных шумов; это парадоксально, потому что профессиональное заболевание — физическое повреждение слуха у сотен тысяч людей, занятых на производстве, — гораздо более серьезная проблема, чем нарушение покоя граждан чрезмерным шумом. Кодекс правил по уменьшению дозы шума, получаемой работающими по найму, о котором шла речь в гл. 5, был опубликован только в 1972 г. Хотя постановления заводского законодательства от 1961 г. были достаточно широки, так что заводские инспекторы могли возбуждать дела о вредном воздействии шума, они никогда не пользовались своим правом, частично из опасения проиграть дело и тем самым создать нежелательный прецедент. Представляется, что приписать ослабление слуха дозе шума, полученной человеком на работе, оказывалось затруднительным ввиду отсутствия соответствующих документальных данных; огромность же последствий признания самого факта пугала власти. Сами жертвы

считали глухоту естественным результатом жизни, связанной с работой в шумной отрасли промышленности. В 1974 г. был принят Закон об охране здоровья и о безопасности труда, хотя вопросы шума в нем специально и не оговаривались. Однако в этом законе сказано, что обязанностью каждого предпринимателя является такая постановка дела на производстве, которая в пределах разумной возможности обеспечивает отсутствие риска здоровью и безопасность для лиц, работающих у него по найму.

Аналогичным образом оговаривается обязанность предпринимателя в разумных возможных пределах так проектировать и изготавливать продукцию, чтобы таковая была безопасна и не представляла риска для здоровья при правильном ее использовании. Хотя здесь шум специально и не упоминается, без сомнения, сохранение слуха человека так же важно, как, скажем, безопасность пальцев.

Впрочем, как и в случаях нарушения покоя граждан, на работе лучше всего опираться на обычное право, ссылаясь на пункт о небрежности, явившейся причиной ущерба. Такая небрежность считается правонарушением в той же мере, как и нарушение покоя граждан, и поэтому ее определение недостаточно точно. «.. упущение в совершении чего-либо, что благоразумный человек, руководимый соображениями, которые обычно необходимы при ведении дел, совершил бы, или совершение чего-либо, что благоразумный и осторожный человек не совершил бы»¹, — вот одна из попыток определения. Быть может, наилучший вариант был предложен одним новозеландским судьей, который сформулировал проблему следующим образом:

а) какие опасности должен был бы предвидеть (ответчик), проявляющий разумную степень предусмотрительности?

б) какие меры должны бы быть (ему) известны в условиях разумной заботы и при наличии общедоступных сведений?

¹ Дело Блайта против Бирмингемской водопроводной компании (1856 г.).

в) были ли меры, о которых (он) должен был знать, против опасности, которую (он) должен был предусмотреть, таковы, что давали (ему) право отвергнуть их как чрезмерно дорогие и хлопотные для применения?

Существует важный пункт, ограничивающий возможность возбудить судебное преследование за небрежность. Согласно английскому законодательству, предпосылкой к ответственности за допущенную небрежность служит наличие *обязанности* со стороны лица, допустившего небрежность, проявить заботу о пострадавшей стороне. Определение условий, при которых такая обязанность имеет место, настолько же расплывчато, как и все другие определения; однако существуют прецеденты, на основе которых в число взаимоотношений, когда такая обязанность возникает, включаются отношения врача и пациента, ученика и учителя, поверенного и клиента, одного лица, пользующегося дорогой, и другого, также пользующегося ею, хозяина и слуги (архаические термины для работодателя и служащего). Нам подходит последний пункт этого перечисления.

Первое дело такого рода, выигранное в суде¹, было иском обрубщика гребных винтов, который страдал от чрезмерного шума в течение ряда лет. Когда истец поступил на данную работу в 1957 г., слух его не имел отклонений от нормы. Он работал в обрубочном цехе на процессах, включавших фасонирование гребных винтов из марганцевой бронзы при помощи пневматических зубил. По его словам, когда он впервые вошел в цех, шум перепугал его до полусмерти; другой свидетель говорил, что шум «граничил с болевым порогом». В 1957 г. ответчик располагал двумя размерами ушных заглушек вместо пяти или, возможно, семи, и выбор размера был предоставлен истцу. Для того чтобы ушная заглушка или любой другой тип ушного протектора обеспечивали эффективную защиту, они должны приходиться по мерке; как признал судья, чтобы создать необходимую защиту, выбор подходящей заглушки не должен был предоставляться

¹ Дело Берри против Марганцевой морской компании (1972 г.).

самому пострадавшему; для этого требовалась какая-либо форма контроля, например со стороны медицинской сестры или пункта первой помощи. Судья объявил без каких-либо колебаний, что ответчик нарушил свою обязанность оказывать разумную заботу. Ответчик признал, что примерно с 1968 г. он должен был бы предоставлять рабочим вместо ушных заглушек протекторы в виде наушников.

Ответчик проиграл дело, так как не смог представить никаких доказательств того, что он проявлял внимание по отношению к проблеме чрезмерного шума на заводе; в результате судья счел необходимым вынести заключение, что ответчик не проявил в данном случае достаточной заботы о рабочих и нарушил свою обязанность, не предоставив рабочим наушников. Ответчик утверждал, что, даже если бы он предоставил персоналу наушники в 1957 г., истец все равно не стал бы их носить. В ответ на это адвокат истца мудро заметил, что в обязанность ответчика входило предпринять такие шаги по пропаганде и убеждению, которые бы обеспечили ношение наушников, а судья признал, что, будь соответствующая кампания по пропаганде проведена, истец не был бы в 1957 г. столь неразумным, чтобы отказаться от ношения наушников. Его милость судья присудил истцу компенсацию в размере 1250 фунтов стерлингов и добавил, что если бы тот возбудил дело на пять лет раньше, то по процедурным юридическим причинам сумма компенсации была бы вдвое выше.

Результаты этого дела показывают, что в обычном праве иски о небрежности относительно шума могут стать столь же частыми, как и иски по нарушению покоя граждан чрезмерным шумом.

Какого заглушения можно добиться? Как конструировать малошумящие механизмы?

Как конструировать малошумящие механизмы? Что нужно изменить в конструкции, чтобы уменьшить их шум?

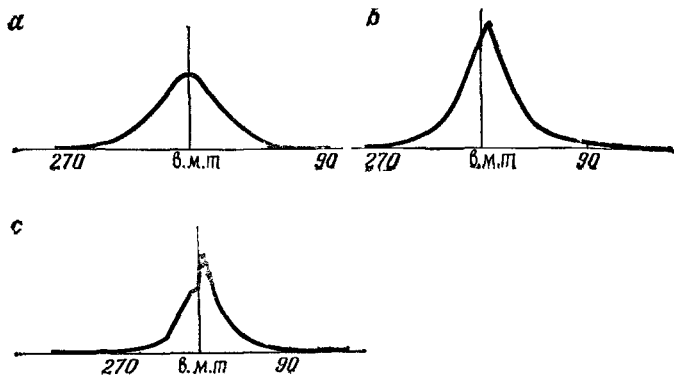
Мы уже познакомились с тремя этапами создания шума: исходное возмущение, его усиление и видоизменение, а также излучение звука. Если вы не считаете, что таблетка аспирина излечит вас от неприятного ощущения, вызванного гвоздем, торчащим из сиденья стула, то, когда речь пойдет о шуме, вы, конечно, сразу подумаете, нельзя ли устранить исходное возмущение? Разумеется, это наилучший подход, но часто ли можно им воспользоваться? Возьмем, например, дизельный двигатель. Исходное возмущение здесь — рост давления в камере сгорания, но ведь это и есть сам источник мощности двигателя. В турбореактивном двигателе сжигание горючего, сопровождаемое шумом, — единственный способ создать требуемое ускорение газов, направленное в сторону, обратную движению. В пневматическом перфораторе шум создают повторяющиеся удары наконечника зубила, — но именно для этого и спроектирован весь механизм. Таким образом, перспективы не представляются многообещающими, однако в действительности здесь возможностей для снижения шума больше, чем кажется на первый взгляд.

В гл. 6 мы рассматривали график давления в цилиндре дизеля и видели, что при помощи анализа Фурье это давление можно представить в виде суммы компонент — чистых тонов с соответственно подобранными амплитудами и фазами. Амплитуды компонент высших гармоник определяли уровень шума, обусловленного резонансами корпуса двигателя. Если бы нам

удалось добиться того, чтобы спектр Фурье достаточно резко падал на высоких частотах, то уровень звука мог бы снизиться децибел на 15.

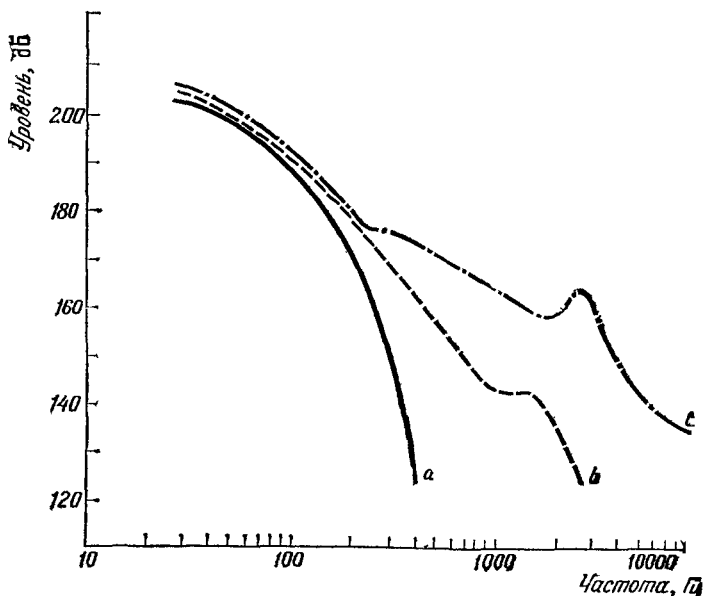
На рис. 47 показаны три графика давления в цилиндре некоторого дизельного двигателя, совершающего 1000 об/мин. Рис. 47, *a* соответствует вращению дизеля сторонним двигателем, когда горючее вообще не впрыскивается: воздух просто сжимается и расширяется при проворачивании вала двигателя. Это наиболее гладкая кривая изменения давления, какую только можно получить; на рис. 48 показано, что, начиная примерно со 100 Гц, величина компонент Фурье в этом случае спадает очень быстро. К сожалению, использовать двигатель в этом режиме никому не нужно! Кривая *b* представляет график давления того же двигателя в условиях наибольшей плавности изменения давления, которую можно получить при собственном ходе двигателя. Обратите внимание на несколько более острый пик давления и на крутой прямолинейный участок вблизи верхней мертвой точки (в. м. т.). Это — момент, непосредственно следующий за впрыскиванием горючего, когда происходит его сгорание. В этом случае сгорание протекает постепенно, за время, в течение которого вал поворачивается на 20°. На рис. 48 показан спектр и для этих условий. Ввиду менее плавной формы кривой давления высшие компоненты разложения в спектр примерно на 20 дБ превышают по величине соответствующие значения для кривой *a*. За исключением «горбика» в области 1600 Гц, кривая *b* не менее плавная, чем соответствующая кривая для бензинового двигателя с той же величиной максимального давления в цилиндре. «Горбик» обусловлен резонансом газа в камере сгорания, когда он «ударяется» о стенки.

Теперь взгляните на кривую *c* — самую страшную из этого трио. Она изображает рост давления в случае, когда сгорание происходит почти мгновенно в верхней мертвой точке. Видно резкое, почти вертикальное нарастание давления до значения свыше $28 \cdot 10^5$ Н/м², которое сопровождается заметными осцилляциями, накладывающимися на основную кривую. Не удивительно, что эта кривая содержит высокочастотные компоненты Фурье большой величины; боль-



Р и с. 47. Осциллограммы давления в цилиндре дизеля при вращении посторонним двигателем (а), наиболее гладкая кривая при собственном ходе двигателя (b), наиболее крутая кривая при собственном ходе двигателя (с).

Все кривые сняты при 1000 об/мин (в. м. т. — верхняя мертвая точка).



Р и с. 48. Частотные спектры кривых, представленных на рис. 47.

шой «горб» наблюдается на частоте около 2600 Гц. Этот частотный спектр немногим лучше спектра пилообразного сигнала (с сигналами такого вида встречаются в электронике), сравниться с которым по шумности не может ни один двигатель, даже созданный самым злонамеренным проектировщиком.

Что касается исходного возмущения, картина выглядит более безнадежной, чем казалось на первый взгляд. Как, однако, можно было бы сгладить рост давления? Для начала можно отрегулировать момент вспышки. Кривая *b* соответствует более раннему зажиганию, чем кривая *c*, и, хотя их различие обусловлено не только этим обстоятельством, легко видеть, что оно также важно. Если впрыскивание горючего происходит непосредственно перед прохождением поршнем верхней мертвой точки, то процесс начинается при более высоком давлении в самом цилиндре. Это приводит не только к более высокой температуре и более быстрому зажиганию, но и к усилению давления, вызываемому внезапным сгоранием горючего и наложением создаваемого давления на самый высокий участок исходной кривой сжатия. При более раннем впрыске усиление давления, налагаясь на кривую сжатия, создает менее зазубренную кривую. Вернемся к кривой *c*. Непосредственно перед скачком давления в верхней мертвой точке наблюдается уплощение кривой, подобное уплощению на кривой *a*. В самом деле, если прикрыть рукой правую половину кривой *c*, остальная часть ее выглядит совсем как кривая *a*. Скачок давления наступает в самый худший момент, потому что увеличение сжатия прекращается в момент, когда поршень пришел к концу своего хода. Если бы тот же скачок давления накладывался на кривую сжатия раньше, где и без того происходит быстрый рост давления, оба наклона слились бы вместе более плавно и уровень высокочастотных компонент значительно бы уменьшился.

Однако регулировка момента вспышки не единственный существенный фактор. Важно также, как именно горючее впрыскивается в камеру сгорания. Если оно попадает на стенки камеры, то наблюдается неравномерность распределения горючего и воздуха в камере. Тогда сгорание топлива происходит медлен-

нее, чем при впрыскивании горючего в середину камеры, где мгновенно образовалась бы смесь горючее — воздух. Поэтому в первом случае горение — более медленный процесс и склон кривой давления не такой крутой; субъективно мы обнаружим, что стук в дизеле почти полностью исчез; в принципе это похоже на предупреждение детонации в бензиновом моторе, где высокая степень сжатия достигается путем применения высокооктанового бензина, что предупреждает преждевременное самовозгорание при высокой температуре, создаваемой большим сжатием, и регулирует процесс сгорания топлива.

Теоретически, чем более плавно идет график давления в цилиндре, тем больше должен быть коэффициент полезного действия двигателя. В конце концов, двигатель — это «шумовая машина», в которой требуемая мощность создается в результате превращения основной частоты колебаний давления в цилиндре в механическое вращение при помощи поршней и коленчатого вала. Энергия, заключенная в высших гармониках, бесполезна, поскольку колебания поршня в цилиндре происходят только на основной частоте. Чем более сглажен график давлений, тем большая часть энергии приходится на нижнюю гармонику и может быть передана на коленчатый вал.

Что можно сказать об исходных возмущениях в других двигателях, например в турбореактивном двигателе? Здесь дело обстоит иначе: хотя для получения струи сгорание топлива необходимо, флуктуации давления не нужны. Постоянное давление в цилиндре двигателя дизеля бесполезно, но постоянное давление в камере сгорания реактивного двигателя было бы идеалом! Действие реактивной струи никак не связано с колебаниями давления, которых мы пока не можем избежать просто из-за недостаточно высокого уровня современной техники.

Наиболее нежелательные флуктуации давления возникают не в камере сгорания, а после выбрасывания газов из сопла при турбулентном смешении их с окружающим воздухом. Множество исследований проводилось и продолжает проводиться с целью добиться более плавного смешения отработанных газов и воздуха на выходе из сопла. Испытывались сопла

разных конструкций, но основной фактор, который необходимо учитывать при любой модификации, — это, конечно, сохранение тяги двигателя. В ранних разработках применяли сильную гофрировку сопла (рис. 49), облегчающую перемешивание вследствие более глубокого засасывания воздуха в струю газа непосредственно позади сопла. Это давало возможность снизить уровень шума в диапазоне средних частот на 6—7 дБ. Было также установлено, что уменьшение диаметра сопла сдвигает частотный диапазон шума вверх, а поскольку поглощение звука в воздухе растет с частотой, это, казалось, давало некоторый выигрыш. Но ввиду того что наибольшая чувствительность нашего уха к шуму лежит вблизи 4000 Гц, а проблема шума самолета встает наиболее остро, когда самолет летит вблизи земли, в целом это мероприятие ухудшало ситуацию.

Наибольший шаг на пути снижения шума струи был сделан при создании турбовентиляторных двигателей типа Роллс-Ройс RB 211, которые устанавливались на воздушных лайнерах Тристар компании Локхид. Этот тип двигателя получил название двухконтурного. Первая ступень его настолько увеличена в диаметре, что ее скорее следовало бы считать многолопастным вентилятором, чем ступенью компрессора. Она заключена в большой капот. Далее следует

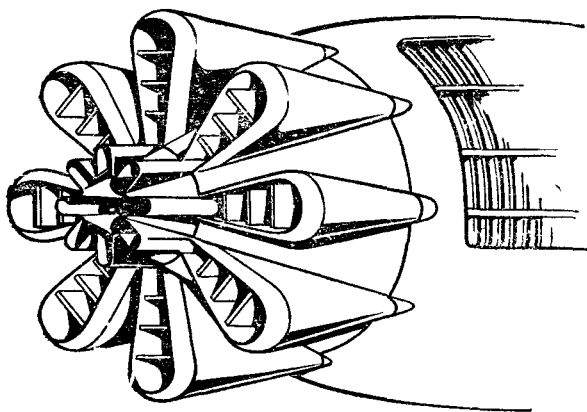


Рис. 49. Восьмилепестковый глушитель реактивного двигателя.

остальная часть компрессора, у которой, так же как и у капота двигателя, диаметр меньше, чем вентилятор. Значительная доля воздуха, отбрасываемая первой ступенью, обходит двигатель снаружи и выходит через заднее отверстие большого капота. Через двигатель проходит лишь малое количество воздуха. В результате, хотя ускоряется значительная масса воздуха, только часть ее проходит через камеру сгорания и отбрасывается в виде высокоскоростной струи. Большая же часть отбрасываемого воздуха, имеющая ту же температуру, что и окружающая атмосфера, обтекает наружную поверхность двигателя и, доходя до выходного отверстия сопла, образует между турбулентной струей и окружающей атмосферой буферную зону. Воздух, прошедший снаружи двигателя, менее турбулентен, чем струя, что само по себе уже снижает шум; кроме того, благодаря наличию промежуточного слоя воздуха, обтекающего двигатель, смешение газов струи и холодного атмосферного воздуха происходит гораздо более плавно.

Дело было бы попроще, если бы шум турбореактивного (или турбовентиляторного) двигателя создавала только струя; в действительности это не так. Есть также возмущения, обусловленные аэродинамическими взаимодействиями при вращении лопаток компрессора и (в гораздо меньшей степени) лопаток турбины. Последние поколения двигателей фирмы Роллс-Ройс воплощают в себе главное нововведение в этой области: обычные входные направляющие лопатки здесь полностью выброшены, благодаря чему исключен важный источник возмущений, вызываемых прохождением каждой лопатки через области пониженной скорости воздуха позади неподвижных направляющих лопаток. Шум взаимодействия венцов ротора и статора был снижен путем увеличения зазора между венцами и подбором наилучшего соотношения между числами лопаток в одном и другом венце.

Эти двигатели снабжены также тремя отдельными пустотелыми концентрическими приводными валами, что позволяет снизить скорость вращения вентилятора, который приводится в движение другим валом, чем компрессор. Кроме того, двигатель имеет также

устройство, предназначенное для изменения площади и формы сопла от круговой до прямоугольной, это изменяет характеристику направленности шума, отклоняя бóльшую часть его вбок; в результате было получено снижение шума у поверхности земли на 3 дБ. Дальнейшего уменьшения шума двигателя удалось достигнуть при помощи значительного количества звукопоглощающей облицовки, встроенной в различные воздуховоды. Как мы увидим в следующей главе, звукопоглощающая облицовка воздуховода может значительно ослабить бегущий вдоль него звук. В каждом двигателе звукопоглощающей облицовкой покрыто около 20 м² поверхности воздухоприемника вентилятора и выходного воздуховода (рис. 50). В низкотемпературных воздуховодах используются волокнисто-пористые пластмассы, в горячих участках — металло-волокнистые материалы. Как показано в гл. 8, частотный диапазон эффективности волокнистых поглотителей сдвигается вниз при устройстве зазора между ними и стенкой. Поэтому облицовка воздуховода вентилятора, где частоты более низкие, чем в выхлопном газопроводе, укреплена с зазором, тогда как в выхлопном газопроводе в этом не было нужды, поскольку шум турбины более высокочастотный. Конечно, самый низкочастотный звук генерируется на струе, уходящей от двигателя, и никакие поглощающие облицовки тут не помогут. Однако ввиду большой степени двухконтурности шум струи

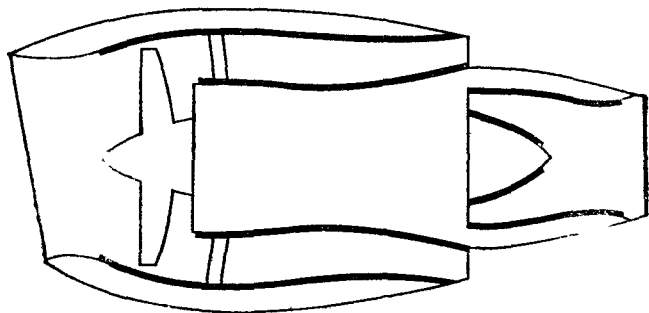


Рис. 50. Звукопоглощающая облицовка авиационного двигателя
(жирная линия).

двигателя RB 211 оказывается ниже шума вентилятора, компрессора и турбины, взятых вместе.

Теперь перейдем к исходным возмущениям в других устройствах. В пневматическом перфораторе практически нельзя повлиять на основной механизм создания шума — периодическое воздействие сжатого воздуха на поршень, — не снизив существенно эффективность перфоратора. Несмотря на то что и для цилиндра перфоратора можно получить график давления, аналогичный графику для цилиндра дизеля (график для перфоратора более зазубренный), пути превращения флуктуаций в шум тут совсем другие и поэтому сглаживание кривой давления в цилиндре перфоратора не приведет к снижению шума.

Однако шум многих других механизмов можно значительно снизить. Например, для дыропробивного прессы можно изготовить пунсон с разной высотой режущей части в разных точках, чтобы удар по изделию не приходился одновременно по всей поверхности. Резкость удара при этом сильно снизится. Разумеется, если появится возможность заменить резкий удар непрерывно нарастающим давлением, как в гидравлическом прессы, проблема шума будет почти исключена.

Удары, возникающие при действии многих механизмов, по существу, никак не связаны с их работой. В этих случаях эффективность механизма не пострадает от применения амортизирующих прокладок и подкладок. При ударе какой-нибудь деталью по амортизирующему элементу последний сожмется, поглощая энергию удара, которая в результате потерь на трение, вызванных внутренним поглощением в материале, обратится в тепло. Различные дыропробивные прессы содержат множество источников совершенно излишнего ударного звука, который можно подавить при помощи резиновых¹ амортизирующих подкладок.

Чтобы такие резиновые прокладки или подкладки выполняли свои функции не только на высоких частотах, они должны быть достаточно толстыми и

¹ Термин «резина» подразумевает здесь наряду с натуральной резиной самые различные полимерные материалы.

податливыми. Ясно, что при отсутствии существенной деформации материала нельзя получить большое поглощение энергии, поэтому иногда приходится использовать прокладки толщиной до 20—30 мм. Важно отдавать себе отчет в том, что резина практически несжимаема. Это может звучать подобно выражению «вода не текуча», и, однако, это верно. Резину можно сильно продеформировать, только подвергая ее сдвиговым напряжениям, но не путем всестороннего сжатия. Наступив на маленький кусочек резины, мы расплющим его, но только потому, что он раздастся во все стороны. Такое выпячивание в стороны происходит вследствие сдвигающих напряжений, действующих под прямым углом к приложенной силе. Если вставить кусочек резины в стальное кольцо, легко обнаружить, что он перестанет сжиматься: он не сможет более раздаваться в стороны.

С этой важной особенностью поведения резины мы встретимся еще не раз. Пока речь идет о поглощении энергии ударов, следует учитывать, что при сжатии большого куска сплошной резины он окажется податливым только в той мере, в какой он сможет раздаваться в стороны с боков. Если раздаваться ему некуда или если его боковая поверхность мала, как в большом листе, то резину можно рассматривать как жесткое тело. По этой причине для поглощения ударов микропористая резина (с закрытыми порами) зачастую пригоднее, чем сплошная, потому что воздушные карманы пор позволяют резине деформироваться во всех направлениях. При небольших нагрузках микропористая резина действительно дает гораздо большую деформацию, но не менее важно то, что при большой нагрузке она сплющивается и снова становится как бы сплошной. К сожалению, случаи резких ударов в механизмах встречаются довольно часто. Например, пишущая машинка работала бы гораздо тише, если бы ее валик был сделан из микропористой резины. Правда, тогда отпечатки букв были бы едва заметны!

На примере реактивного двигателя мы видели, что снизить аэродинамические возмущения может оказаться очень трудным. Для твердых тел, движущихся относительно воздуха, применение обтекаемых форм

напрашивается в первую очередь; хорошее аэродинамическое проектирование лопастей вентиляторов, во всяком случае, может исключить излишнее вихреобразование. В частности, существенно, чтобы угол атаки лопастей не был слишком велик. Во всех случаях, когда имеет место взаимодействие ротор — статор, например между лопастями вентилятора и его стойками или между ротором и статором электромотора, увеличение просвета эффективно снижает аэродинамические возбуждения. Этот способ может, однако, вступить в противоречие с другими соображениями: например, раздвигание ротора и статора может снизить коэффициент полезного действия механизма. В некоторых центробежных вентиляторах уровень шума на частоте прохождения лопастей можно уменьшить путем увеличения просвета между ротором и языком улитки. Важно также избегать турбулентности на входе вентилятора. Дело в том, что размеры вихрей могут оказаться настолько большими, что они повлияют на подъемную силу лопастей, а изменение подъемной силы означает колебания давления, а следовательно, и шум.

Безусловно, положение почти всегда можно улучшить тщательным подбором числа элементов в роторе и статоре. Четырехлопастный ротор, вращающийся в непосредственной близости к четырем направляющим лопаткам, создает гораздо более сильный звук, чем если бы направляющих лопаток было три или пять. Как правило, числа лопаток ротора и статора не должны находиться в простом отношении. Тогда различными будут не только основные частоты, создаваемые тем и другим, но и несколько первых гармоник. Выгода получается двоякая: интенсивность дискретных тонов в шуме уменьшится, а раздражающее действие шума снизится, ввиду того что распределение отдельных тонов и их гармоник на более широкий частотный диапазон сделает их менее ощутимыми.

Переходя к механическим исходным возмущениям, заметим, что часто шум можно существенно снизить, уменьшая заводские допуски. Шум шарикоподшипников свидетельствует о неправильной форме шариков и колец: когда-нибудь с этим будет покончено, даже если для этого потребуется отливать шарики

в условиях невесомости на заводе, размещенном на спутнике Земли! Шум вращения при большом числе оборотов может быть снижен путем лучшей балансировки. Когда приходится иметь дело с флуктуирующей силой, следует обратиться к соображениям, рассмотренным для дизеля. Если удастся устранить резкие флуктуации, интенсивность высших гармоник Фурье будет снижена. Если можно нарушить регулярность флуктуаций, звуковая энергия распределится на более широком участке спектра и не будет сосредоточена только на нескольких частотах.

В ближайший раз, когда вы займетесь проверкой покрышек на колесах вашей автомашины (пока они еще не изношены), обратите внимание на узор выступов на катящейся поверхности, особенно по краям: вы увидите, что поперечные прорезы между участками выступающей резины расположены нерегулярно, так что расстояния между ними постепенно изменяются от узких к широким. Это делается для того, чтобы на ходу шины не «свистели»; при такой неравномерности слышно только шипение случайного характера.

На одном участке автострады М10 в порядке эксперимента было использовано бетонное покрытие с поперечными канавками для стока воды. Оказалось, что канавки вызвали громкий визгливый шум, когда над ними проезжали машины, так что встревоженные шоферы на этом участке съезжали на обочину, чтобы взглянуть, не приключилось ли чего-нибудь с задними осями. На другом участке шоссе канавки прорезали на двух чередующихся расстояниях друг от друга, но, как и следовало ожидать, шум и в этом случае состоял из чистых тонов. Избежать этого можно только при полностью случайном распределении промежутков либо при тщательно рассчитанном законе чередования узких и широких промежутков. Последний метод позволяет создать впечатление настолько быстрой трели, что в результате шум распределяется по более широкой частотной полосе: к более широкополосному шуму приводят оба метода. Раньше думали, что причина возникновения чистых тонов — резонансы шин, но это оказалось ошибочным. Хотя выяснилось, что с визгливым шумом бороться можно, все же шум шин на таких шоссе оказался сильнее, чем при качении

по гладкой поверхности; в этом убедились на своем печальном опыте неудачники, поселившиеся по соседству с автострадой М10.

Возникает интересная возможность покрывать поверхность дороги канавками, в какой-то мере аналогичными бороздкам граммофонной записи, и создавать таким образом нечто вроде говорящих дорожных знаков. К сожалению, высота «голоса» дороги будет меняться в зависимости от скорости автомашины: мы услышим голос Поля Робсона при малой скорости и писк утенка Дональда (из мультипликаций Диснея) — при высокой. Можно было бы применять постоянные знаки, залитые в бетон, и изменяемые знаки, создаваемые выдвиганием специальных планок над поверхностью дороги при помощи гидравлического устройства. Поскольку предлагаемая система никогда не сможет быть использована для рекламных целей, она имеет ряд преимуществ, например может служить для предупреждения о дорожных пробках на шоссе при тумане.

Подобный тип исходных возмущений встречается во многих механизмах. Если располагать зубцы циркулярной пилы не строго регулярно, можно было бы, тщательно рассчитав промежутки между ними, растянуть по частоте спектр как аэродинамических возмущений, так и колебаний самой пилы. Для этой же цели в охлаждающих вентиляторах радиаторов автомашин нарушают регулярность в расположении лопастей, что придает им непривычный вид. То же можно сделать с резцами фрез фрезерных и фасонно-фрезерных станков и с канавками сверл.

Однако, если бы все эти исходные возмущения можно было бы отъединить от их усилителей и излучателей-громкоговорителей, жизнь стала бы гораздо тише. Поэтому, если нам и не удается снизить исходные возмущения, еще не все потеряно: во многих механизмах можно достаточно эффективно воздействовать на остальные два звена шумопроизводящей цепочки.

Напоследок вернемся еще раз к дизельному двигателю и посмотрим, что можно сделать с механизмами усиления и излучения, чтобы уменьшить шум. Мы уже знаем, что основная часть шума, возникающего

в камере сгорания, не достигает полностью наружного пространства и это обусловлено различием импедансов между газом в камере сгорания и картером и цилиндрическим блоком. Нам известно также, что главная причина снижения импеданса картера и блока — их резонансы. Если бы удалось ввести какой-либо вид поглощения в структуру картера и цилиндрического блока, который бы уменьшал амплитуду резонанса, был бы сделан важный шаг вперед.

Этому вопросу были посвящены многие исследования; первым начал их д-р Тео Прид, работая в одной промышленной компании; затем он продолжил изучение вопроса, перейдя в Институт исследования шума и вибраций в Саутгемптонском университете. Промышленная компания изготавливала оборудование для впрыскивания горючего в дизелях; чтобы доказать, что инжектор не вносит существенного вклада в шум дизельного двигателя, было предпринято изготовление малошумящего дизеля. Попытки оказались удачными, и было создано два типа двигателей, уровень шума которых субъективно имел, грубо говоря, половинную громкость по сравнению с двигателями обычного типа. Проблема постройки малошумного двигателя решалась двумя путями. Первый — изготовление двигателя с сильно задемпфированными стенками, второй — использование таких материалов и такой формы картера и цилиндрического блока, при которых их жесткость возрастала настолько, что резонансные частоты увеличивались примерно в 5 раз.

В соответствии с этим было построено два почти одинаковых экземпляра двигателя первого типа. Основная рама четырехцилиндрового двигателя с тремя подшипниками коленчатого вала была сварена из стальных листов и несла рубашки охлаждения цилиндров и подшипники коленчатого и кулачкового валов. Элементы конструкции, так же как и головки цилиндров, были стандартными. Такая решетчатая конструкция картера и цилиндрического блока выдерживала все возникающие напряжения, а поскольку общая наружная поверхность каркаса была очень мала, излучение шума резко снижалось. Однако залить в такой решетчатый каркас воду и масло было невозможно. Оставалось найти материалы для боковых

стенок, которые бы не усиливали колебаний каркаса вследствие резонанса: к сожалению, некоторое увеличение шума было неизбежно просто в результате увеличения суммарной наружной поверхности. Были изготовлены съемные панели из различных материалов: стали, свинца, пластмасс и слоистых конструкций («сэндвичей») сталь — резина — сталь. Панели из свинца и пластмасс с их большими внутренними потерями были очень эффективны, но в конечном счете были выбраны слоистые конструкции из стали и резины. Эти панели крепились к ребрам каркаса множеством маленьких винтиков; оказалось, что эти панели излучают шум с уровнем на 15 дБ меньше, чем чугунные стенки обычного картера. В дополнение маслоотстойник картера был изолирован от каркаса при помощи резиновой ленты, а другие крупные металлические крышки, например крышка распределительного устройства, были сильно задемпфированы (они изготовлялись из таких же сэндвичей сталь — резина).

Наибольшие вибрации в дизельном двигателе испытывает коленчатый вал. Это вызвано, как и следовало ожидать, тем, что все скачки давления в камерах сгорания непосредственно передаются на вал. К сожалению, на одном конце вала имеется шкив, и этот шкив ведет себя подобно громкоговорителю. При испытании описываемого «экспериментального экземпляра двигателя» оказалось, что, если снять шкив, шум на частоте 1600 Гц (собственная частота шкива) снижается на 25 дБ. Поэтому был сконструирован шкив из двух частей, что позволило изолировать его от вала: центральная втулка укреплялась на валу, а наружная часть шкива, с большим диаметром отверстия, соединялась с ней при помощи резиновой муфты. По сравнению с обычной конструкцией шкива это давало 15 дБ выигрыша на частоте 1600 Гц.

В результате, после того как снизили также шумы всасывания и выхлопа, а коробка передач была сильно звукоизолирована, шум в «экспериментальном двигателе» снизился по сравнению с обычным примерно на 10 дБ, начиная от 400 Гц и выше. Если не считать низкие частоты, на которых двигатель колебался как целое и на которых поэтому никакое

демпфирование помочь не могло, указанные мероприятия снизили шум до уровня, создаваемого безинновым двигателем той же мощности, и устранили неприятный стук, характерный для дизелей.

Другой тип двигателя был построен совершенно иначе и во многих отношениях меньше подходил для практического осуществления. Картер и цилиндрический блок были отлиты из магния, и толщина их стенок составляла около 30 мм. Вследствие малой плотности магния вес двигателя не превышал обычных значений, но ввиду большой толщины стенок их жесткость на изгиб значительно повысилась. Возникли существенные практические проблемы, связанные с малой прочностью магния на разрыв, а также с его подверженностью гальванической коррозии, но эти трудности удалось преодолеть. Двигатель был снабжен сильно задемпфированными крышками распределительного устройства и клапанных рычагов, а также звукоизолированными маслоотстойником картера и шкивом коленчатого вала, аналогичными тем, которые были применены в экспериментальном двигателе первого типа.

Описываемая конструкция обладала двумя достоинствами. Высокая изгибная жесткость стенок снижала амплитуду вибраций на низких частотах, а обусловленное жесткостью увеличение собственных частот переводило резонансы в ту область, где компоненты Фурье внутрицилиндрического давления имели уже малую величину. По сравнению с первым типом этот двигатель имел преимущество на низких частотах и давал примерно тот же результат на средних и высоких частотах.

Результаты, полученные в промышленной компании и развитые в Саутгемптоне, легли в основу субсидируемого правительством Проекта бесшумного пассажирского транспорта. Институт исследования шума и вибраций разработал малошумящие двигатели, основанные на образцах фирм «Роллс-Ройс» и «Бритиш Лейланд»; одновременно Исследовательское общество моторостроительной промышленности и Лаборатория дорожных исследований проводили дополнительную исследовательскую работу по шумам самой автомашины и по шуму шин. Целью было по-

строить грузовик, уровень шума которого был бы на 10 дБ ниже, чем в существующих моделях, и таким образом показать автомобильной и моторостроительной промышленности, что более «тихие» грузовики можно выпускать по вполне приемлемой цене. Аналогичная программа была начата и в США, хотя там исследования производились по более консервативной программе, предусматривающей вначале только звукоизоляцию двигателя, а не радикальные изменения конструкции.

Успехи, достигнутые при разработке описанных двигателей, можно, разумеется, использовать и для огромного множества других механизмов. Например, предупреждение резонансных явлений относится к наиболее плодотворным методам снижения уровня шума любого механизма. Один из способов добиться этого — ввести затухание. Очевидно, лучше всего получать требуемое затухание, применяя материалы, для которых характерно именно малое усиление колебаний при резонансе. Резина — хорошо известный представитель этой категории материалов: для ее структуры типично наличие длинных молекулярных цепей, скользящих одна по другой при деформации материала, при этом происходит потеря колебательной энергии вследствие трения.

К сожалению, невозможно построить механизм прямо из резины! Одним из наиболее важных открытий последних лет было открытие углеродных нитей. Специальная термообработка позволяет изготовить из длинных прядей синтетического полимера длинные цепочки, образованные углеродными молекулами и обладающие высокой прочностью на разрыв. При связывании со смолами эти цепи образуют «чудо-материал», имеющий прочность стали при значительно меньшем весе. Менее известно другое свойство этого материала — его весьма большие внутренние потери.

Углеродные нити только начали разрабатываться и поэтому пока еще дороги. В настоящий момент их цена еще препятствует целому ряду возможных применений. К сожалению, другие материалы с большим внутренним поглощением обладают малой прочностью и жесткостью. Поэтому приходится применять обычные металлы, например сталь, а поглощение вносить

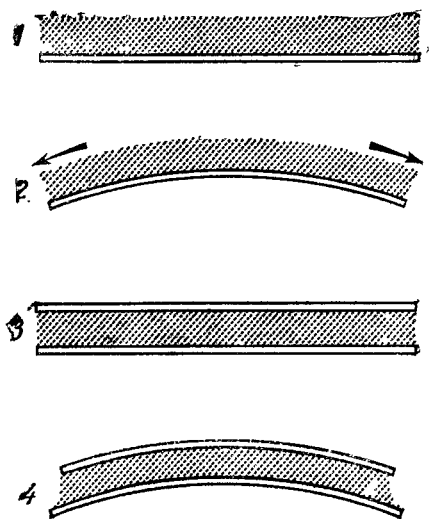


Рис. 51. Неармированный и армированный поглощающие слои.
 1—неармированный поглощающий слой; 2—только продольное растяжение;
 3—армированный поглощающий слой; 4—деформация сдвига.

другими средствами. Мы уже видели, как это было сделано в конструкции экспериментального дизеля; прежде чем переходить к другим применениям таких поглотителей звука, рассмотрим более подробно их действие.

На рис. 51 показана стальная пластина, соединенная со слоем поглощающего звук вещества, например со слоем синтетической резины. Пластина может излучать звук, колеблясь как целое, однако чаще излучение обусловлено изгибными колебаниями пластины. При изгибании пластины резиновый слой также изгибается и, как следует из геометрических соображений, наружная поверхность резины растягивается при изгибании пластины в одну сторону и сжимается при изгибании в противоположную сторону. Рассеяние или поглощение энергии происходит в результате потерь на внутреннее трение при продольных растяжениях и сжатиях резины. Представим теперь, что к наружной стороне резинового слоя приклеен тонкий металлический лист. При изгибании пластины резиновый слой не сможет растянуться или сжаться потому, что он

приклеен к тонкому металлическому листу, обладающему большим сопротивлением растяжению. Это означает, что резиновый слой окажется сильно перекошенным, то есть он испытает большие сдвиговые деформации. Все знают, что согнуть резиновый лист сможет и ребенок, но, чтобы сдвинуть одну поверхность относительно другой на значительное расстояние, потребуются гораздо большие силы. По этой причине «армирование» сильно повышает эффективность демпфирования; при этом тонкий слой резины может оказаться выгоднее толстого, так как в нем сдвиговые деформации будут иметь бóльшую величину.

Приклеивание куска или кусков металлического листа к панели с поглотителем может быть очень эффективным при правильном подборе размеров листа и положения приклейки; эффективность будет зависеть также от частоты. Отсюда, однако, не следует, что обработка поглощающими материалами без армирования ничего не дает: существует много патентованных покрытий, которые легко наносятся на заглушаемую поверхность и часто обеспечивают достаточное поглощение колебаний. Помимо резины, можно применять и другие материалы. Используют целый набор веществ от смесей смол до войлока. Один хорошо известный поглощающий материал похож по внешнему виду на овсянку и имеется в продаже либо в жидком виде, либо в виде самоприклеивающихся листов. В последнем случае его удобно приклеивать к слою звукопоглощающей неопреновой пены, убивая таким простым способом сразу двух зайцев. Несколько легче и дешевле покрытие из двух слоев стеклянной ткани, приклеенной к стали специальной смолой. При этом также достигается огромная жесткость композита, далеко превышающая жесткость стали или стекловолокна в отдельности. При надлежащем выборе смол можно получить и термостойкое демпфирующее покрытие.

Все же армированный сэндвич сталь — резина — сталь обладает множеством преимуществ. Имеются такие конструкции, состоящие из стального листа калибра 20 (толщина 0,95 мм), склеенного смолой с листом калибра 26 (толщина 0,48 мм), что дает общую толщину (около 1,6 мм), соответствующую

калибру 16. Существуют также материалы, склеенные из многих слоев резины и алюминия. К сожалению, их жесткость на изгиб мала, а изготовление их затруднительно. Штамповать эти материалы до сих пор не удается, потому что один из слоев образует складки или трескается. Проводятся опыты по раздельной штамповке слоев и их последующей склейке. При сварке таких композитных листов «начинка» выгорает, а шов получается слабым, потому что зачастую скрепляется только один из слоев сэндвича.

Демпфирование широко применяется для снижения шума в механизмах всех видов. Нанесение демпфирующих покрытий снижает шум на 10 дБ и более во всех случаях, когда звук излучается легкими панелями. Если панели можно спроектировать таким образом, чтобы их резонансная частота нигде не совпадала с частотами исходного возмущения, этого может оказаться достаточно. Общеизвестный пример демпфирования панелей — это обесшумливание автомашин «седан» и вообще дорожных транспортных средств. Панели крыши, пола, капота мотора и крышки багажника — все они обладают множеством резонансов, и демпфирование может принести большую пользу. Применение демпфированных композитных стальных листов позволит снизить шум дорожных перфораторов децибел на 7, при условии что предварительно заглушен шум выхлопа отработанного воздуха. С акустической точки зрения наилучшая композитная стальная конструкция — это полый лист, заполненный свинцовой дробью. Однако на практике такая конструкция не годится, так как при нагревании дробь сплющивается. Пробовали применять в качестве заполнителя медь, марганец, чугун, но это не дает таких же результатов.

Резонансы в твердых телах не единственный тип резонансных колебаний. Вспомним резонаторы Гельмгольца, описанные в гл. 8. Любой замкнутый объем воздуха способен совершать резонансные колебания, и в зависимости от формы и размера объема мы можем встретиться с одной, а чаще с целым рядом резонансных частот. Теоретически способ борьбы с резонансами прост: следует либо задемпфировать колебания, например с помощью волокнистых или пени-

стых материалов, либо конструктивным путем вывести резонансные частоты из опасной области. Чем больше размер воздушного объема, тем ниже резонансная частота, и обратно. Крупные полости ведут себя подобно малым помещениям, и в них могут установиться нормальные колебания, описанные в гл. 10. При наличии «горлышка», соединяющего объем с внешней атмосферой, как в резонаторе Гельмгольца, частота тем выше, чем горлышко шире. Не следует упускать из виду того обстоятельства, что задемпфированный резонатор Гельмгольца весьма эффективно поглощает звук, а это может оказаться очень полезным в некоторых случаях.

Итак, есть три направления борьбы с шумом механизмов. Если не удастся сгладить исходные возмущения, то, наверное, возможно избежать их усиления в результате резонанса, либо вводя демпфирование, либо избавляясь от резонанса путем изменения конструкции. Если и это не удастся, можно воспрепятствовать излучению звука, по возможности устраняя контакты между источником возбуждения и всеми другими частями механизма. В общем руководствуйтесь здравым смыслом!

Обесшумливание и изоляция звука

Увы, иногда никакая информация, вроде той, что мы почерпнули из предыдущей главы, не сможет помочь. Когда сталкиваешься с проблемой шума, которую ставит уже существующий механизм, бесполезно приниматься объяснять, как следовало проектировать его с самого начала. Истина проста: с механизмом уже ничего не сделаешь, но нельзя ли что-нибудь сделать с шумом?

Обратимся к типичному случаю, в котором отчетливо проявляется большинство возникающих практических проблем, — к шуму дизель-генератора. Такие установки используются в качестве резервных агрегатов в самых неожиданных местах — там, где нельзя мириться с возможными капризами Национальной системы электроснабжения. Например, их часто устанавливают в больницах, и там их шум особенно нежелателен. Представим себе, что нам необходимо установить один из таких агрегатов и нет возможности его переконструировать.

Прежде чем предпринимать какие-либо другие меры, необходимо спроектировать antivибрационный фундамент. Это значит, что двигатель и генератор нужно установить на общей вспомогательной раме так, чтобы они не могли смещаться один относительно другого в результате действующих между ними моментов. Затем следует установить раму на шести или восьми упругих амортизаторах, выполненных в виде пружин, либо резиновых прокладок или элементов с резиновыми прокладками, работающими на сдвиг. Эти амортизаторы должны обладать податливостью в вертикальном и горизонтальном направлениях, достаточной для подавления самых низких вы-

нуждающих частот, причем некоторые из шести типов колебаний генератора могут оказаться связанными.

Недостаточно, однако, просто посадить генератор на амортизаторы и успокоиться на этом. Необходимо также, чтобы все связи, ведущие как к двигателю, так и к генератору, были гибкими. Сюда относятся трубопроводы горючего, кабелепроводы, а также воздуховоды.

Если противовибрационные амортизаторы применены не были, последующие мероприятия по снижению шума окажутся в значительной степени обесцеленными, поскольку, помимо генератора, и грунт, и само здание также будут излучать звук даже на значительном расстоянии от генератора (вспомните камертонный эффект); поэтому, в какое бы совершенное звуконепропускаемое ограждение мы ни заключили механизм, все равно достаточно сильный источник шума окажется вне ограждения.

Разумеется, суть проблемы в том, чтобы закрыть пути звуку. Простейший способ воспрепятствовать звуку проникнуть из точки *A* в точку *B* — загородить ему дорогу. Если источник излучает во все стороны, его придется запереть в ящик. В гл. 9 мы говорили об изоляции звука и видели, что для этого в первую очередь требуется масса. Если мы можем выстроить кирпичное или бетонное ограждение — отлично! Как видно из Приложения 2, звукоизоляция таких стен будет очень хорошей. Однако с практической точки зрения это не всегда выгодно. Масса может оказаться чрезмерной, а кроме того, иногда желательно иметь разборное устройство. В этих случаях представляются две возможности: пожертвовать частью желаемого снижения шума или построить однослойную стенку из более легкого материала. Если речь идет только о массе, то, взяв лист мягкой стали нормального калибра 16¹ или доску из прессованной стружки толщиной 25 мм, мы получим дешевый и доступный материал. Однако в стали собственное затухание мало, поскольку это жесткий материал с малым внутренним трением и поэтому в стальных листах возможны резонансы.

¹ Нормальный калибр 16 соответствует толщине листа 1,6 мм.

нансные явления. А мы знаем, что резонансы «проби-
вают бреши» в законе масс. Поэтому необходимы ка-
кие-то дополнительные элементы, поглощающие звук.

Сначала, однако, рассмотрим другую проблему. Как мы помним из гл. 10, если возвести вокруг ис-
точника звука ограждение, результирующее число де-
цибел нельзя найти, просто вычитая из исходного
уровня в децибелах величину звукоизоляции стенок.
Следует еще прибавить десятикратный логарифм по-
верхности перегородок, обращенных в интересующую
нас сторону, и вычесть десятикратный логарифм
среднего коэффициента поглощения поверхностей
внутри помещения. Это обусловлено тем, что звуко-
вая волна, идущая от источника к стенке помещения,
частично проходит наружу, а частично отражается
обратно. Отраженная волна вновь попадает на стен-
ку, снова частично проходит наружу и отражается
еще раз. Другими словами, часть волны, которой не
удается проникнуть через ограждение сразу, отра-
жается и опять повторяет свою попытку. Поэтому,
если стены хорошо отражают звук изнутри, наружу
пройдет больше звука, чем в случае, когда стены по-
глощающие.

Это означает, что стенки ограждения следует по-
крыть изнутри звукопоглощающим материалом. Если
этого не сделано и если, например, средний коэффи-
циент поглощения равен всего 0,05, то прибавить сле-
дует $10 \lg 0,05 = -13$ дБ. Действие ограждения ока-
жется сниженным на 13 дБ. Представим себе, что
ограждение покрыто изнутри слоем минеральной
шерсти толщиной 50 мм; учитывая, что сама поверх-
ность дизель-генератора отражающая, примем — ко-
нечно, с известной долей произвола — средний коэф-
фициент отражения при 500 Гц равным 0,6. Тогда
потеря изолирующего действия ограждения составит
всего $10 \lg 0,6 = -2$ дБ, что на 11 дБ лучше, чем в
предыдущем случае. (Заметим, что подобные расчеты
следует производить по крайней мере для каждой из
6—8 октавных полос.)

Возникает еще практический вопрос: как закреп-
лять покрытия из минеральной шерсти на стенках?
Здесь пригоден любой способ — металлические сетки,
перфорированные металлические листы, как и для

закрепления акустической плитки. Для ограждения из листового металла использование минеральной шерсти дает добавочный значительный выигрыш в результате ее демпфирующего действия. Для деревянных ограждений это не так необходимо, потому что дерево обладает немалым затуханием и само по себе.

Если каменное ограждение построить нельзя, а однослойная перегородка из стального листа калибра 16 не дает необходимой изоляции, можно, как было указано в гл. 9, применить принцип двойной перегородки. Это, в частности, можно сделать, построив снаружи первого ограждения такое же второе на расстоянии примерно 150 мм и установив оба ограждения на лентах из податливой микропористой резины (это мероприятие желательно провести и для однослойного ограждения).

В более сложных системах применяют конструкции типа «сэндвич» из более легких перегородок, зажатых между слоями минеральной шерсти. Можно, разумеется, применять и различные другие поглотители звука, например неопреновые или полиуретановые пенопласты, которые, однако, требуют специальной противопожарной обработки; тем не менее они оказываются более экономичными и не нуждаются в специальных закреплениях. Но не всякий старый пенопласт пригоден для этой цели: поры должны быть сообщающимися, а сопротивление продуванию должно быть достаточно большим.

Размеры ограждения влияют на его эффективность в двух отношениях. Во-первых, излучение в данном направлении будет тем больше, чем больше размеры соответствующей стенки. Кроме того, поскольку существенно среднее значение коэффициента поглощения внутри ограждения, а некоторые механизмы обладают большими жесткими, хорошо отражающими звук поверхностями, то для того же механизма и той же акустической облицовки ограждения средний коэффициент поглощения для большого ограждения будет выше, чем для малого. Поэтому нередко оказывается целесообразным сделать ограждение побольше, в частности, еще и потому, что тогда можно будет установить дверь для прохода внутрь при ремонте и

уходе за механизмами и обойтись без съемных панелей.

Типичный пример, когда подавление резонанса воздушного объема позволяет снизить общий шум, — это дымоход котельной, в котором к случайному шуму может добавиться компонента чистого тона, так как случайные исходные возмущения, создаваемые сгоранием горючего в воздухе, ведут себя подобно завихрениям, которые создает музыкант, дующий в блок-флейту (см. гл. 3), причем дымовая труба ведет себя как корпус флейты. Избежать такого резонанса трудно — это вопрос тщательного выбора размеров. Все котельные установки различны, и поэтому универсальных рекомендаций не существует, но если резонансы дымовой трубы дают существенный вклад в суммарный шум, то иногда единственный выход — установить глушитель типа, который будет описан в следующей главе.

Другой важный пример — это вентилятор, присоединенный к приемному или выходному трубопроводу. Главное требование здесь — отличие резонансов трубопровода от частот прохождения лопастей вентилятора и их гармоник. Аналогичные неприятности могут встретиться в пылесосах и электромоторах.

Снижение амплитуды резонансов может предупредить нежелательное и иногда существенное усиление шума, но зачастую еще более важно снизить эффективность излучения. Вспомним, что каждую точку излучающей поверхности можно рассматривать как отдельный самостоятельный точечный источник звука. Отсюда вытекают два следствия. Во-первых, на краях поверхности можно ожидать деструктивной интерференции (см. рис. 31); во-вторых, вдвое большая поверхность, колеблющаяся с той же амплитудой, что и меньшая, будет излучать вдвое большую энергию, то есть создаст уровень шума на 3 дБ выше. Ударив по камертону и держа его в руке, мы получим едва слышный звук, что обусловлено как интерференцией звуков, создаваемых его двумя ножками, так и малой поверхностью ножек. Прижав рукоятку камертона к столу, мы обнаружим возрастание уровня звука. Это объясняется тем, что колебательная энергия передается доске стола, которая сама начинает колебаться;

вследствие ее больших размеров интерференция мала, а площадь излучающей поверхности велика. При инженерных расчетах обычно можно пренебречь поглощением энергии в столе; тогда оказывается, что, поставив камертон на доску площадью $0,01 \text{ м}^2$, мы получим уровень звука на 3 дБ ниже, чем для доски площадью $0,02 \text{ м}^2$.

Поэтому, например, для электрического мотора, установленного на перекрытии прямо на болтах, к площади источника звука следует прибавить и поверхность пола, и, даже если не вмешаются еще и резонансные явления, шум мотора будет излучаться весьма эффективно из-за больших размеров излучающей поверхности. Простое средство — установка мотора на упругом фундаменте — обеспечит значительное снижение шума. Вспоминая, что в некоторых строительных материалах, например в бетоне, звук распространяется на большие расстояния с малыми потерями, легко понять, что, не принимая мер по изоляции механизма от опоры, мы рискуем распространить эффективный «источник звука» до самых удаленных точек здания.

Вопрос эффективности излучения весьма важен и при меньших масштабах установок. Недавно мне пришлось встретиться с сильными вибрациями трубы на частоте 3 кГц. Труба была обшита и сама по себе излучала немного звука, но кронштейны, на которых труба была закреплена и которые находились снаружи обшивки, вынуждали всю конструкцию издавать громкую ноту этой же частоты.

Для того чтобы заглушить шум пишущей машинки, часто применяют войлочную подкладку, но, как ни странно, мало кто догадывается принять те же меры по отношению к другим механизмам. Служащие нередко подвергаются совершенно ненужному шуму от адресных машин просто потому, что те жестко установлены на больших поверхностях. Дело обстоит гораздо серьезнее, когда 200-тонный пресс жестко прикреплен болтами непосредственно к плите настила — в этом случае страдать будут и жители соседнего дома. Насосы передают шум в трубы, а трубы крепятся к стенам; даже моторы на упругом фундаменте могут передавать шум по жестким

кабелепроводам. Когда я купил себе автомашину, электрический промыватель ветрового стекла отвратительно шумел просто потому, что был прикреплен непосредственно к стенке корпуса. Упругое крепление сразу сделало работу механизма неслышной.

Пожалуй, во всех случаях, прежде чем принимать какие-либо меры по обесшумливанию, следует попытаться виброизолировать источник исходного возмущения от всех других предметов. Это особенно важно, когда дело касается крупных механизмов, к которым прикреплены насосы и моторы, а также элементы, работающие со стуком. Обычно в таких ситуациях возникают и резонансы, и, разумеется, изоляция источника возмущений намного снизит требования к поглощению звука.

Что же такое собственно виброизоляция? Недостаточно просто подложить попавшийся под руку старый кусок резины или пробки под механизм: это может либо ничего не дать, либо даже ухудшить положение.

Большинство виброизоляторов рассчитано на низкочастотные колебания, лежащие даже ниже слышимого диапазона. К сожалению, более глубокое рассмотрение этого вопроса выходит за пределы нашей книги. Для получения виброизоляции мы снова попытаемся осуществить рассогласование импедансов, а это означает, что фундамент должен быть как можно более податливым: чем ниже его жесткость, тем выше изоляция. Фундамент, однако, должен быть достаточно массивным, чтобы выдержать вес самого механизма. В качестве амортизаторов фундамента можно применять цилиндрические пружины или листовые рессоры; можно также использовать другие упругие материалы, например резину или даже воздух. Однако пружина с прикрепленной к ней массой образует резонансную систему с некоторой определенной резонансной частотой, и если сила, приложенная к массе, меняется с той же частотой, то, разумеется, получится усиление колебаний, для борьбы с которым придется вводить поглощение. Но даже если поглощение настолько велико, что система, предоставленная самой себе после сжатия пружины, возвращается к своему исходному состоянию без колебаний,

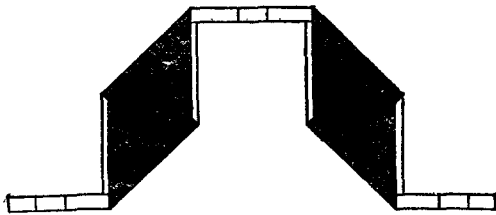


Рис. 52. Типичный резиновый амортизатор для фундамента (в разрезе).

никакой изоляции вибраций не получится и амортизатор лишь не ухудшит положения.

Вообще нельзя получить выигрыша, пока вынуждающая частота не превзойдет резонансную частоту нагруженного амортизатора более чем в $\sqrt{2}$ раз, а заметное подавление вибраций начинается, только когда отношение этих частот превысит 2. Теоретически изоляция вибраций продолжает возрастать по мере увеличения этого отношения, однако в действительности это верно только при выполнении ряда предположений, в том числе предположения об идеальной жесткости опоры фундамента. На практике нельзя рассчитывать на изоляцию, превышающую 20 дБ, а если опора или настил слишком податливы, то и это недостижимо, особенно на резонансных частотах самого настила. При изоляции вибраций звуковой частоты нельзя ограничиваться пружинами в качестве амортизаторов, потому что высокочастотный звук прекрасно распространяется по металлу вдоль витков пружины. Во многих случаях нежелательны только низкочастотные вибрации, и тогда это обстоятельство несущественно; однако, если приходится бороться и со звуковыми частотами, амортизаторы должны содержать резиновые прокладки, или, где возможно, следует пользоваться резиновыми амортизаторами.

Еще и еще нужно повторить, что плотная резина, если она подвергается деформации сжатия, бесполезна в качестве амортизатора, за исключением случаев, когда поперечные размеры резинового блока или полоски малы по сравнению с их толщиной. В большинстве резиновых амортизаторов резина

испытывает сдвиговые деформации, для которых этот материал гораздо более податлив (на рис. 52 изображена типичная конструкция такого амортизатора).

Собственная частота колебаний груза на амортизаторе связана с прогибом амортизатора под лежащей на нем нагрузкой. На рис. 53 дан график, связывающий эти величины. Однако для выбора нужного типа изолятора при данных вынуждающих частотах требуется специальный расчет, поскольку агрегат, установленный на амортизаторах, может одновременно колебаться шестью различными способами с шестью разными частотами.

Особое внимание следует уделять конструкции дверей и панелей ограждения; щель в 2 мм по периметру двери для обслуживающего персонала, пробитой в стене площадью 4 м², может снизить звукоизоляцию стены на 15 дБ (см. рис. 43). Сами двери должны иметь звукоизоляцию, отличающуюся не более чем на 5—10 дБ от изоляции стены, и должны быть снабжены воздухонепроницаемым уплотнением. Для этого можно применить микропористую резину или полосу из фосфористой бронзы; дверь должна также иметь нажимной затвор. Для окон, при не слишком большой их площади, можно ограничиться одной рамой

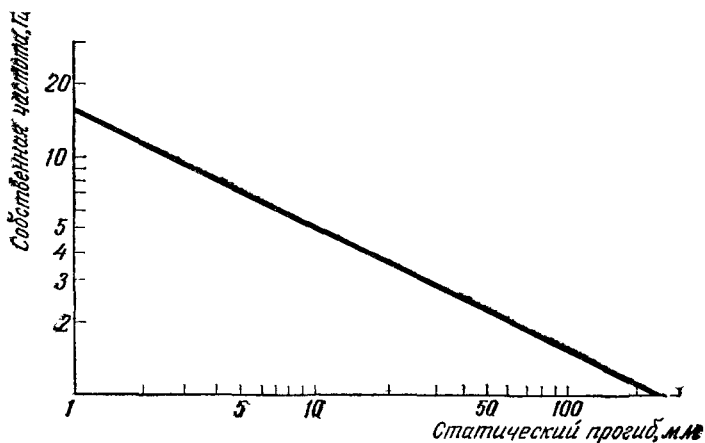


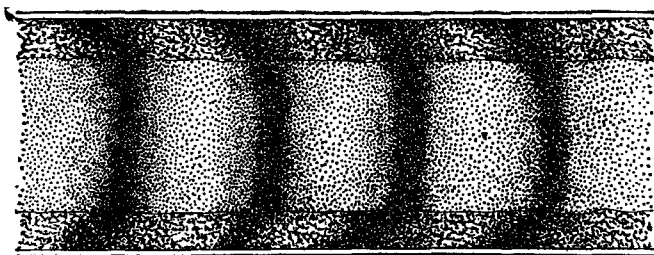
Рис. 53. Зависимость между собственной частотой фундамента и его статическим прогибом под нагрузкой.

со стеклом толщиной 6 мм; если добавляется вторая рама, то следует обе рамы закреплять упруго.

Поскольку проектируемое нами ограждение предназначено для дизель-генератора, возникают дополнительные проблемы, в частности вопросы охлаждения, которые могут оказаться очень серьезными. Если радиатор дизеля размещен при установке, то окажется необходимым впускать и выпускать из ограждения несколько тысяч кубических метров воздуха в час. Каким же образом пропускать воздух внутрь и наружу, в то же время не выпуская наружу шум?

Прежде всего придется прорезать в стене входное и выходное отверстия. Это откроет дорогу воздуху, но также и звуку. Как обычно, отверстия можно рассматривать как самостоятельные источники звука. Эти источники будут создавать полусферические волны. В области более высоких частот скажутся интерференционные эффекты, вследствие которых излучение высокочастотного звука будет направлено в основном вперед от отверстия.

Что здесь можно предпринять? Каким образом заглушить шум, бегущий в газовом потоке вдоль трубы или воздуховода? Если воздуховод полностью перекрывает отверстие, звук будет распространяться внутри него двумя путями: часть волн, вошедших в воздуховод, побежит, отражаясь последовательно то от одной, то от другой стенки. Другие волны побегут прямо вдоль воздуховода как плоские волны, не ударяясь о стенки. Если стенки воздуховода плохо отражают звук, то есть поглощают его, то волны первого типа далеко не «убегут». Как далеко пробегут эти волны, зависит от угла, под которым они падают на стенки, ширины воздуховода и коэффициента поглощения облицовки стенок. Для обычного типа звукопоглощающей облицовки амплитуда волн, падающих под углом, превышающим 30° , снизится до уровня плоских волн уже на расстоянии примерно четырех поперечников воздуховода (рис. 54). Что касается плоских волн, то причина их поглощения не так проста. При распространении плоской волны вдоль облицованного воздуховода она частично (вблизи стенок) бежит в звукопоглощающем материале. При колебаниях частиц воздуха вперед и назад вязкое



Р и с. 54. Плоские волны в воздуховоде с поглощающей облицовкой.

сопротивление в порах материала приведет к диссипации части энергии звуковой волны. Однако в соответствии с принципом Гюйгенса (образование вторичных волн) энергия, поглощенная вблизи стенок, возмещается за счет энергии основной части волны, распространяющейся в середине воздуховода, аналогично тому как дифракция приводит к проникновению звука в теневую область позади экрана. В результате энергия основной части волны все время поступает к краям, где она поглощается, и по мере распространения в воздуховоде волна затухает. Кроме того, скорость звука в звукопоглощающей облицовке значительно меньше скорости звука в воздухе; она составляет около 200 м/с (а в воздухе — 344 м/с). Это различие оказывает то же действие, что и градиент температуры, — круто «изгибает» волну у краев, где часть фронта волны, бегущая внутри поглощающего материала, отстает от фронта основной части волны. Это изгибание фронта волны приводит к тому, что энергия волны устремляется внутрь облицовки. Поскольку облицовка не полностью поглощает звук, волна частично отразится обратно в воздуховод, но эта отраженная волна скоро затухнет.

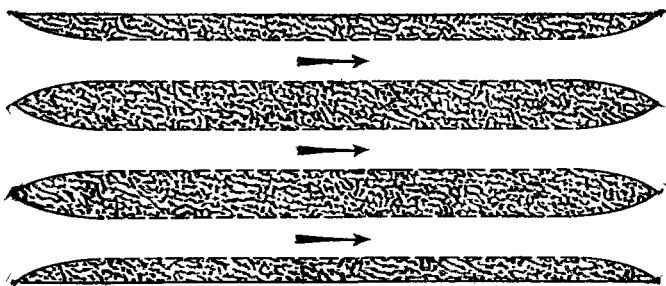
На ослабление плоской волны оказывают влияние четыре фактора: ширина воздуховода, толщина облицовки, сопротивление продуванию в облицовке и частота звука. Особенно существен последний фактор. Если длина звуковой волны велика по сравнению с толщиной облицовки, затухание на краях волнового фронта сравнительно мало; при понижении частоты

ты затухание уменьшается. Впрочем, длина волны еще более существенна по другой причине. На высоких частотах интерференция приводит к взаимному уничтожению волн, бегущих в облицовке; в результате звуковое давление внутри облицовки резко падает и звуковая энергия переносится в виде пучка, занимающего среднюю часть сечения воздуховода, без какого-либо влияния поглощающих стенок. Частота, на которой начинается это явление, связана с шириной сечения воздуховода.

В целом оказывается, что затухание в облицованном воздуховоде пропорционально толщине облицовки и обратно пропорционально ширине сечения за вычетом толщины облицовки. Что касается сопротивления продуванию облицовки, то здесь можно руководствоваться величиной коэффициента поглощения: наибольший коэффициент поглощения соответствует и наибольшему сопротивлению. Затухание в облицованном воздуховоде растет с частотой до тех пор, пока звук не образует пучка, распространяющегося вдоль средней линии воздуховода, независимо от стенок. Это происходит при частоте, когда длина волны в воздухе примерно равна ширине воздуховода.

Немало формул измышлялось для того, чтобы определять эффективность облицовки в воздуховоде путем расчета. Некоторые из них дают недопустимую погрешность, другие невозможно применить на практике. Наилучший путь — составление таблиц, основанных на реальных испытаниях; подобная таблица приведена в Приложении 5. Простая облицовка всех четырех стенок воздуховода прямоугольного сечения еще не предел возможного. Весьма эффективна конструкция, в которой звук проходит по узким каналам между поглощающими стенками, — пластинчатый глушитель с звукопоглощающими перегородками, разделяющими воздуховод вдоль его длины (рис. 55). Такие перегородки часто применяют в патентованных глушителях, используемых в вентиляционных системах.

Почти всегда решающий фактор — это необходимость пропустить требуемый объем воздуха по воздуховоду при минимальном сопротивлении его протеканию. Если бы не это требование, можно было бы



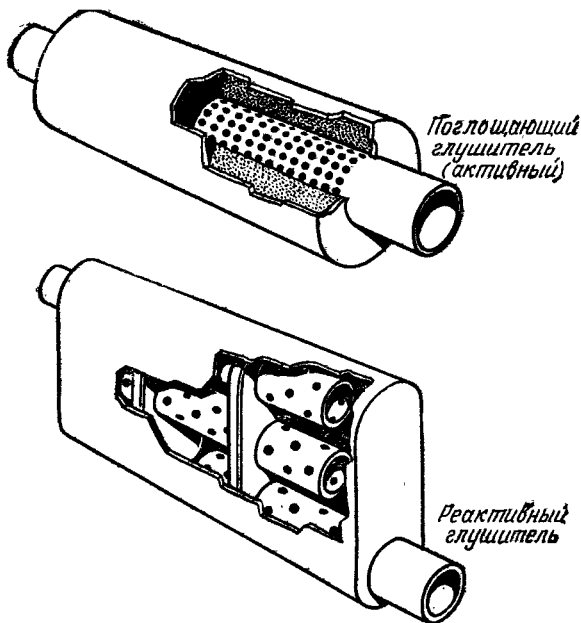
Р и с. 55. Воздуховод с пластинчатым глушителем.

добиться огромного ослабления, круто изгибая воздуховод, так чтобы плоская волна ударялась об облицовку, рассеивалась и быстро поглощалась.

Итак, мы справились с проблемой подачи и вывода охлаждающего воздуха внутрь ограждения нашего дизеля. А что нужно предпринять для гашения звука всасывания и выхлопа огражденного двигателя внутреннего сгорания? Мы привыкли к виду заржавевшей выхлопной трубы нашего автомобиля; зачастую мы видим и внутренность глушителя, когда из него вываливается последний клочок ржавого металла, возвещая о том, что погиб еще один глушитель! Вскрыв глушитель автомашины, мы увидим всего лишь какую-то оболочку с несколькими торчащими из нее трубками. Как же работает глушитель?

Разумеется, для глушения можно использовать короткий круглый воздуховод, облицованный поглощающим материалом (проточный глушитель). Однако основная часть энергии шума выхлопа (как и шума всасывания) сосредоточена на низких частотах, в частности на частоте следования вспышек в двигателе, а если, как обычно, процессы сгорания различаются от цилиндра к цилиндру и от такта к такту, то это может привести к субгармоникам еще меньших частот.

Как известно, глушители с поглощением работают плохо именно на низких частотах; к счастью, желаемое ослабление низкочастотных звуков удастся получить при помощи совершенно другого метода — правда, ценой некоторого дополнительного противодавле-



Р и с. 56. Глушители выхлопа.

ния в трубе. Работа этого другого типа глушителя в отличие от поглощающего глушителя основана на реактивном принципе. Основной вид реактивного глушителя — это просто расширительная камера¹, не содержащая ничего, кроме воздуха. И здесь снова мы встречаемся с рассогласованием импедансов. Вместо того чтобы приводить электрические аналоги, лучше объяснить происходящие в этом глушителе процессы путем сравнения его с антивибрационными амортизаторами, о которых мы уже вкратце говорили.

Расширительная камера соединена выхлопным трубопроводом с источником звука и выхлопным патрубком — с атмосферой. Если источником звука служит выхлоп двигателя, он будет посылать в расширительную камеру периодические импульсы давления,

¹ Расширительная камера — это участок трубы большего сечения, чем основной воздуховод. — *Прим. ред.*

которые можно рассматривать как набор синусоидальных волн, в котором наибольшая доля энергии сосредоточена на основной частоте. Эти импульсы напоминают возбуждающую силу, действующую на механизм, установленный на пружинном амортизаторе (см. стр. 246). Расширительная камера — это ограниченный объем воздуха, и, как всякий объемный резонатор, она имеет свою резонансную частоту. Если эта резонансная частота совпадает с основной частотой источника шума, возникает тот же эффект, как для механизма, установленного на пружине и образующего с ней систему с той же собственной частотой, что и частота колебаний механизма, а именно большое усиление колебаний. Собственной частотой обладает и выхлопной патрубков; его роль аналогична роли податливого перекрытия под амортизатором, на котором стоит двигатель. В результате получится некоторая общая основная частота собственных колебаний камеры вместе с патрубком. При совпадении этой частоты с частотой возбуждения колебания значительно усилятся и глушитель сможет ослаблять звук только в результате потерь на трение при колебаниях газа.

Возвращаясь к механизму, установленному на амортизаторах, мы вспоминаем, что при увеличении числа оборотов усиление уменьшается и заменяется ослаблением — изоляцией вибраций. В точности то же происходит и с резонатором. При возрастании частоты источника звука усиление прекращается при достижении частоты, в $\sqrt{2}$ раз большей, чем собственная частота резонатора. По мере дальнейшего увеличения отношения частот колебания воздуха проходят наружу все в меньшей степени; ослабление упадет на резонансной частоте второй гармоники. Затем кривая ослабления снова поднимается вверх и снова круто падает вниз на каждой из высших гармоник основной резонансной частоты.

При конструировании резонансного глушителя следует учитывать три важнейших обстоятельства. Во-первых, упругость «пружины». Чем больше поперечное сечение расширительной камеры, тем мягче воздушная пружина и тем большей изоляции звука можно достигнуть. Во-вторых, собственная частота

камеры, зависящая в основном от ее длины. И наконец, собственная частота выхлопного патрубка, которая определяется его длиной. Есть, однако, еще два обстоятельства, которые могут исказить наши предсказания, но учесть которые чрезвычайно трудно — это импеданс источника и импеданс нагрузки на выходе.

Обратимся сначала к импедансу источника. Когда мы имеем дело с механизмом, установленным на пружинном амортизаторе, то при изменении упругости амортизатора сила, действующая на механизм, существенно не меняется. Другими словами, импеданс источника в этом случае велик. Точно так же глушитель не повлияет существенно на импульсы, излучаемые двигателем при выхлопе, если противодействие остается малым. Импеданс на входе расширительной камеры мал, так как ее поперечник велик; импеданс на входе выхлопного патрубка велик, так как его поперечник мал; наконец, импеданс наружной свободной атмосферы на выходе патрубка мал (напомним, что его малой величиной обусловлено возникновение стоячих волн в трубе, см. гл. 3). Все эти нарушения согласования между импедансами и приводят к ослаблению волны, проходящей через глушитель. Поэтому же, изменив импеданс источника или нагрузки на выходе, мы изменим и эффективность глушителя. В качестве примера источника звука, обладающего малым импедансом, можно привести громкоговоритель. Следовательно, если проводить испытания реактивного глушителя, пользуясь громкоговорителем как источником изолируемого шума, можно будет прийти к излишне пессимистическим заключениям. Аналогично, изменяя что-либо в выхлопном патрубке, например присоединяя его еще к одному глушителю, можно понизить эффективность первого глушителя, потому что изменится импеданс нагрузки. Подобные соображения показывают, почему в механических системах при закреплении пружин амортизатора на массивном основании получается лучшая виброизоляция, чем при закреплении на легком или податливом основании.

Разумеется, принцип реактивного глушения не исчерпывается устройством единственной прямоочной

полости. Полость может содержать боковое ответвление, подобное резонансному поглотителю (см. гл. 8). В этом случае получается картина, обратная той, что наблюдается при действии прямоточной камеры: на резонансной частоте достигается не наименьшее, а наибольшее ослабление, а энергия при этом поглощается сильнее всего в результате интенсивных колебаний среды в горлышке резонатора.

На практике выхлопные глушители изготавливают в виде многокамерных систем, снабженных боковыми ответвлениями, работающими как резонаторы. Чтобы сделать «воздушную пружину» мягче, можно выдвинуть соединительные трубки внутрь камеры — это увеличит создаваемое ею затухание. Установка двух камер одна за другой не обязательно удваивает ослабление звука, однако при правильном соединении камер можно получить даже более чем двойной эффект. Большая часть реактивных глушителей, появившихся на рынке сбыта, была разработана эмпирически много лет назад, и до сих пор их исследования проводятся методом проб и ошибок. Можно надеяться, что теперь для расчета глушителей будут широко применять вычислительные машины, что позволит разработать действительно эффективные модели.

Недостатком этих глушителей следует считать провалы их эффективности на некоторых частотах. На высоких частотах гармоники резонансов следуют одна за другой, и в этой области эффективность глушителей может оказаться недостаточной. Во многих глушителях предусматривают дополнительную ступень поглощения для борьбы с высокочастотным звуком; имея дело с двигателем, следовало бы сначала устанавливать реактивный глушитель, а затем ниже по течению — прямоточный глушитель с поглощением. Один из изготовителей рекомендует для получения наилучших результатов выбирать длину выхлопного патрубка равной его десятикратному диаметру.

Активные и реактивные глушители применяют не только для глушения выхлопа двигателей внутреннего сгорания. Оба типа оказываются весьма полезными для глушения шума выходного окна пневматического перфоратора, но, к сожалению, как бы хорошо ни был спроектирован глушитель, он несколько сни-

жает эффективность работы механизма. Шум удастся уменьшить всего на 5—7 дБ, чему не следует удивляться, так как выхлоп отработанного воздуха — лишь один из источников звука. Параллельное использование задемпфированных стальных деталей улучшило бы ситуацию, так же как демпфирование и изоляция корпуса механизма. Обычно в перфораторах для дорожных работ применяют глушители-чехлы, служащие одновременно двум целям. Такой глушитель состоит из непроницаемого съемного рукава, или мешка, закрывающего выходное окно и пришнурованного к корпусу перфоратора своей нижней частью, где расположен диск с прорезями, через которые отработанный воздух выходит наружу. Весь мешок изнутри покрыт поглощающей облицовкой и образует вместе с корпусом перфоратора частично облицованный воздуховод. Кроме того, закрывая наружную поверхность перфоратора, мешок несколько снижает излучение шума корпусом перфоратора. Однако, что бы мы ни делали с перфоратором, нельзя избежать непосредственного контакта стального инструмента с дорогой, а в результате камертонного эффекта поверхность дороги сама становится излучателем шума.

Теперь мы можем вернуться к дизель-генератору и приспособить аналогичное устройство к выхлопной системе. При этом необходимо следить за тем, чтобы все соединения были гибкими. Комбинацию фильтра с глушителем, работающую на том же принципе, можно применить и для воздухоприемника. Следует иметь также в виду, что реактивные глушители излучают звук своими корпусами, и, если придется располагать глушитель вне акустического ограждения, все наши мероприятия будут сведены на нет. Лучшее решение в этом случае — закопать глушитель на возможно большую глубину в землю. В противном случае не обойтись без обшивки глушителя каким-либо покрытием.

Есть два способа нанесения покрытия, и очень важно выбрать из них наиболее подходящий. Если корпус изолируемого механизма резонирует, что можно выяснить, сравнивая его отклик на возбуждение разными частотами со спектром шума в условиях

эксплуатации (иногда достаточно просто прислушаться к звуку удара по корпусу тупым инструментом), то следует применить демпфирующее покрытие. Резонанс можно сильно снизить, покрыв корпус достаточно толстым слоем поглощающего состава типа патентованных обмазок на основе смол. Однако для многих объектов, например для глушителей, в которых вибрации корпуса вызываются процессами, происходящими внутри корпуса, добавочное затухание едва снизит амплитуду на какой-нибудь один децибел. Если дело не в резонансах, то простое удвоение массы корпуса уменьшит шум децибел на 5, что не так уж много. В этом случае лучше всего вспомнить принципы, изложенные в гл. 9, и закрыть механизм непроницаемой оболочкой с поверхностной плотностью примерно 5 кг/м^2 , лежащей на упругой подложке, например слое минеральной шерсти, которая к стати подавит и возможные резонансы. Наружная оболочка не должна нигде соприкасаться с колеблющейся поверхностью, а в качестве материала оболочки можно взять что угодно — от металлического листа до затвердевающих составов или каких-либо тяжелых гибких пластмассовых листов фабричного изготовления.

Несколько отклоняясь в сторону, отметим, что подобная проблема часто возникает при образовании мощной турбулентности позади клапана газопровода при протекании газа через отверстие клапана со скоростью, превышающей скорость звука (число Маха $M > 1$). Если на мало-мальски длинном участке газопровода возникает мощное развитие завихрений, создается значительное излучение резкого высокочастотного случайного шума. Оказалось, что с таким весьма высокочастотным шумом можно бороться, обшивая трубу толстым слоем плотного пористого волокнистого материала, например плотного стекловолокна, даже без наружной обшивки. Это как бы противоречит традициям акустики, но ряд недавних работ показал эффективность этого метода. Институт прикладной физики в Дельфте ведет по шуму труб исследовательские работы, от которых можно ожидать интересных результатов. Однако обшивка трубы не единственное необходимое мероприятие в подобных случаях, потому что зачастую вибрации прони-

кают обходным путем через опоры, на которых лежит труба, и звук будет излучаться стенкой, поддерживающей конструкции. Это снова старая история о камертоне, стоящем на поверхности стола; ясно, что для труб необходимо применять гибкие опоры.

Теперь нанесем последние штрихи в наше описание схемы звукоизоляции дизель-генератора. Во-первых, нельзя допускать в стенках ограждения ни зазоров, ни трещин. Во-вторых, ограждение не должно иметь жесткого контакта ни с какой колеблющейся частью установки, в том числе и с системой выхлопа, опора которой должна стоять на земле, а сама она должна упруго соединяться с двигателем. Сам же агрегат, дизель-генератор, не должен иметь жесткий контакт с землей. В месте, где выхлопная труба проходит через ограждение, следует сделать отверстие большого диаметра и для его герметизации использовать гибкое прокладочное асбестовое кольцо. Для других труб, которые не раскаляются во время работы, можно применить резиновое или фетровое уплотняющее кольцо. Небольшое добавочное ослабление получится, если выхлопной патрубков и жалюзи охлаждающей системы не будут обращены в направлении, в котором желательно снизить уровень шума, потому что эти источники звука обладают направленностью на средних и высоких частотах.

К сожалению, эксплуатация множества механизмов не позволяет заключить их внутрь ограждения. Например, может оказаться, что к механизму необходим настолько частый доступ, что даже дверь с электроприводом не спасает положения. Таковы, в частности, малые прессы и клепальные машины, в которые оператор должен непрерывно подавать детали. В этом случае все же приносит пользу ограждение, имеющее отверстие вместо двери. Уровень интенсивности звука, излучаемого отверстием, пропорционален логарифму его площади; кроме того, опять-таки в силу несогласованности импедансов, если длина волны велика по сравнению с отверстием, имеет место отражение, подобное тому, какое происходит, когда плоская волна подходит к открытому концу трубы. Низкочастотный звук лишь с трудом излучается через относительно малое отверстие. Более того, вышедший

звук не имеет направленности, следовательно, из отверстия не выходит интенсивного звукового пучка, как это имеет место для звука, длина волны которого мала по сравнению с размерами отверстия.

Если необходимо проделать в ограждении небольшое отверстие, например, чтобы пропустить к механизму ленту конвейера, можно решить проблему звукоизоляции, поместив конвейер в туннель со стенками, покрытыми звукопоглощающим материалом; такой туннель будет действовать как облицованный воздуховод или прямоточный глушитель. Иногда все ограждение можно выполнить в виде облицованного изнутри туннеля, хотя, если его размеры велики, значительный шум будет излучаться с концов.

Нельзя забывать и о том, что механизмы обычно размещаются внутри зданий, а мы уже рассматривали вопрос о роли реверберации в помещениях. Зачастую в цехе звукопоглощение невелико, так что уже на расстоянии порядка двух метров от источника звука реверберационный звук больше, чем прямой. Это особенно важно в тех случаях, когда ограждения и экраны устанавливаются не со всех сторон, потому что улучшение получается только в непосредственной близости к механизму, там, где до установки экрана прямой звук преобладал. Если в помещении только один главный источник звука, то установка экрана наиболее эффективна при расположении экрана в непосредственной близости к источнику звука; часть энергии поглотится в системе механизм — экран и не распространится дальше. Это особенно существенно для направленных источников звука и экранов, расположенных с соответствующей стороны. Но вспомните вездесущий логарифм: если источник ненаправленный, а экран охватывает угол в 180° , то даже при коэффициенте поглощения экрана, равном 1,0, то есть при полном поглощении падающего на экран звука, звуковая энергия, поступающая в помещение, в целом снизится всего на 3 дБ, что едва заметно. В действительности дело обстоит еще хуже, так как коэффициент поглощения экрана обычно ниже 1,0, и для ненаправленного источника звука энергия уменьшится только на величину, равную десятикратному логарифму доли окружности, охваченной экраном, умножен-

ной на коэффициент поглощения экрана:

Снижение мощности излучаемого звука =

$$= 10 \lg_{10} \left(1 - \frac{\theta \alpha}{2\pi} \right),$$

где θ — угол (в радианах) сегмента, загороженного экраном, а α — коэффициент поглощения звука экраном при нормальном падении звука. Например, экран, охватывающий половину окружности и имеющий коэффициент поглощения, равный 0,7, снизит реверберационный шум только на 2 дБ. Можно уточнить расчет, приняв во внимание направленность источника, если она существует, что немного улучшит результат, но разница будет невелика.

Экранирование помогает направить звук, но следует помнить, что звук дифрагирует, обходя экран, и что этот эффект увеличивается с понижением частоты (см. рис. 34). Экран, поверхность которого обращена к источнику, сильно поглощает звук, что несколько снизит дифракцию, но было бы неразумно рассчитывать на больший эффект экранирования, чем на 5—6 дБ при частотах выше 500 Гц; ниже же этой частоты мало на что можно рассчитывать. Эффект экранирования сильно зависит от расположения источника и приемника (поскольку от этого зависит угол погружения в акустическую тень), а также от эффективной высоты экрана. Звук, выходящий из-за края экрана, как бы создается длинной линией источников, а звук с обеих сторон экрана приведет к появлению интерференционной картины (как на рис. 35), в которой даже при случайном шуме эффект экранирования окажется зависящим от направления.

Верный способ снизить реверберационный звук — увеличить средний коэффициент поглощения открытых поверхностей в помещении. Чрезвычайно существенно уяснить себе то обстоятельство, что в большинстве случаев, пока мы не удвоим полное поглощение, разницу в реверберации нельзя будет заметить. Укладка акустических плиток на внутренней поверхности крыши цеха дает обычно не более 5—6 дБ, причем операторы, находящиеся часто в области, где преобладает прямой звук от механизмов, не заметят

никакого улучшения. Некоторые приемы, конечно, позволяют улучшить положение, например укладка звукопоглощающих панелей в пространстве между стропильными фермами крыши. Существуют также специальные поглотители — большие тела с поглощающей поверхностью; если подвесить к потолку достаточное число таких поглотителей, иногда можно преодолеть трудности, связанные с наличием в цехе лабиринтов труб, и обойтись без облицовки отражающих поверхностей акустическими плитками. Как правило, следует располагать возможно большее количество поглощающих материалов вблизи источников звука.

Однако снижение реверберации путем увеличения поглощения — это наиболее дорогой способ, а эффект невелик. Целесообразнее с самого начала приобрести более тихий механизм или даже, посоветовавшись со специалистом, внести изменения в его конструкцию, так чтобы уменьшить излучение шума. Повсеместное применение antivибрационных фундаментов уничтожает камертонный эффект и зачастую больше снижает шум, чем акустический потолок, особенно на низких частотах. Следует помнить, что на высоких звуковых частотах простые пружины — плохие изоляторы. Если внести изменения в сам механизм не представляется возможным, то хорошо спроектированные акустические ограждения в большинстве случаев дают вполне достаточное ослабление шума, даже если в них приходится проделывать отверстия. Нередко проектирование ограждений и экранов, сочетающих требуемые акустические, эргономические и экономические параметры, требует большого искусства, но, к счастью, есть достаточно весьма опытных специалистов, изготавливающих соответствующее оборудование.

Разумеется, бывает, что в самом месте создания шума никто не жалуется, тогда как соседи поднимают по этому поводу громкий крик. Шум завода мешает жителям округи; обладатели систем высококачественного воспроизведения звука доводят соседей до иступления. Что касается заводов, то, очевидно, любые мероприятия по снижению шума внутри цехов приведут и к снижению наружного шума. Однако иногда

можно не беспокоиться об уровне шума внутри, но необходимо улучшить звукоизоляцию шумного помещения. Это, безусловно, относится к комнатам любителей громкой музыки. Нельзя ничего добиться, просто налепляя акустические плитки на стенку, отделяющую нашу комнату от комнаты соседа. Мы видели в гл. 9, что это не увеличит изоляцию стены. Вероятно, комната нашего любителя музыки имеет достаточное поглощение, снабжена ковром, занавесями и мягкой мебелью. Акустические плитки на стене, разделяющей комнаты, не могут более чем удвоить поглощение, а это даст только 3 дБ для реверберирующего звука. Облицевав все четыре стены и потолок акустическими плитками, можно выжать еще несколько децибел, и тогда проникать будет преимущественно прямой звук, а никакое поглощение внутри комнаты не может повлиять на прохождение прямого звука.

Во всех случаях, когда реверберация в шумном помещении не слишком велика (средний коэффициент поглощения не ниже 0,1), поглощение не решит проблему уменьшения передачи звука между помещениями, разве что можно удовлетвориться — редкий случай! — горсточкой децибел. Задача оказывается трудной; даже если любитель музыки удвоит массу перегородки, отделяющей его от соседнего помещения, то больше 5 дБ он не выиграет. Придется ему строить двойную перегородку со вторым слоем на упругой опоре. На первой перегородке ему нужно будет установить мягкие резиновые изоляторы (в возможно меньшем числе) и повесить на них второй непроницаемый слой с поверхностной плотностью примерно 10 кг/м^2 , так чтобы этот слой нигде не имел жесткого контакта с основной стеной. Зазор между поверхностями должен быть не меньше 50 мм, его следует заполнить звукопоглощающим покрытием, например из минеральной шерсти, что предотвратит резонансы замкнутого воздушного объема. Край второго слоя необходимо уплотнить на стенах и на потолке при помощи мастики — здесь также не должно быть жесткого контакта.

И опять же придется огорчить вас, так как и этот метод не даст всего, что требуется, потому что звук, падающий на другие стены, пройдет по твердой

конструкции и, достигнув соседней комнаты, снова излучится в нее со стен. Звук может проходить большие расстояния по бетону и в многоквартирном доме может наделать немало бед.

В случае когда ударный звук — звук, передающийся по конструкциям, — становится основной проблемой, пожалуй, единственным решением может быть постройка помещения внутри помещения, как это было описано в гл. 9, причем внутреннее помещение должно укрепляться на виброизолирующих опорах и нигде не соприкасаться с основной конструкцией. Пространство между наружным и внутренним помещениями должно быть снабжено звукопоглощающей облицовкой, а двери в обоих помещениях должны быть звуконепроницаемыми.

Иногда постройка специальных ложных стен и потолка может все же улучшить звукоизоляцию более чем на 10 дБ, даже при учете боковых путей распространения звука. Вариант такого решения — плавающее перекрытие, которое не только улучшает звукоизоляцию конструкции пол — потолок, но и снижает ударный шум. Обычно это шум шагов жильцов верхнего этажа, и он может быть главной помехой. Здесь помогает мягкое покрытие пола в верхней квартире, но плавающие полы имеют ряд преимуществ, в частности они создают теплоизоляцию, что особенно существенно, если отопительная система расположена под полом.

Плавающий пол представляет собой мат из минеральной шерсти, уложенный на стропилах или на бетонных плитах перекрытия. Поверх такой прокладки располагается дощатый настил либо тонкий слой бетона. Следует иметь в виду несколько моментов: при полах с деревянными стропилами нельзя допускать слишком большого давления на мат, который может спрессоваться в твердую массу; крепежные гвозди не должны проникать из досок плавающего пола в стропила. При использовании бетонных слоев появляются ограничения на предельную площадь пола, при которой еще не возникает опасность трещин в бетоне: при больших площадях необходимо разделить перекрытие на участки. Во всех случаях маты должны быть подвернуты на краях, а при установке плинтуса нуж-

но следить, чтобы он не доходил до пола. Как всегда, лозунгом должно быть: никаких жестких контактов.

Такую конструкцию не часто можно использовать на заводах, где обычно возводят наклонные крыши из волнистых асбестовых плит. Если проникновение шума через крышу существенно, то можно применить *воздухонепроницаемый* подвесной потолок, устанавливая его как можно ниже. Обычный акустический подвесной потолок оказывается непригодным, если только не сделать его непроницаемым с обратной стороны. Некоторые фибровые акустические плитки непроницаемы, и их применение дает дополнительную выгоду — снижение уровня реверберации. Обыкновенная штукатурка как материал для подвесного потолка улучшает звукоизоляцию, но, разумеется, не влияет на реверберацию. Число подвесных стержней должно быть минимальным, а их закрепление по возможности упругим.

К счастью, заводские крыши обычно не самое слабое место в проблеме звукоизоляции: опасны обычно двери и окна. Казалось бы, глупо все время напоминать: держите двери и окна закрытыми, но часто это облегчает решение проблемы. Впрочем, как только инспектор здравоохранения перестанет жаловаться на шум снаружи, заводской инспектор поднимет шум по поводу вентиляции! Можно установить простую вытяжную систему вентиляции, но отверстия для подачи и отвода воздуха нужно снабдить поглощающими глушителями. Если заводской шум действительно слишком силен и доносится даже через закрытые двери и окна, то окна можно заложить стеклянными блоками, а для дверей подобрать специальную тяжелую конструкцию с воздухонепроницаемыми уплотнениями. Однако, если через двери все время ходят, это может привести к большим осложнениям; частичный выход из положения — заменить двери акустическими экранами, установленными перед дверными проемами. Следует еще учитывать возможность того, что в помещении с запечатанными окнами рабочие начнут страдать клаустрофобией (боязнью закрытых пространств), несмотря на достаточное кондиционирование воздуха. Тогда снова придется подумать о снижении шума в самом источнике.

Если ничто другое не помогает, можно все же заткнуть уши пальцами. Вряд ли при этом работник сохранит ту же производительность труда! Но, к счастью, есть способ получить тот же результат, оставляя руки свободными для других дел. Это — ушные протекторы, они имеют большие преимущества и еще бóльшие недостатки. Существует четыре разновидности ушных протекторов: два типа протекторов, вставляемых в ухо, и два — наружных.

Первый тип вставляемого протектора — это тампон или заглушка-пробка из мягкого материала, предназначенная для разового употребления. Следует помнить, что все принципы акустики справедливы, когда дело касается защиты уха; будет мало прока, если заткнуть ухо клочком ваты: вата слишком пориста и обладает слишком малой массой. В крайнем случае может помочь вата, смоченная какой-либо жидкостью, но это явно мало подходящий способ для всеобщего применения. В аптеках продаются шарики из провощенного волокнистого материала, из которых можно сделать заглушку в ухо, но они вызывают неприятное ощущение. Наилучший вид ушной заглушки разового пользования — изделие из так называемого стеклянного пуха. Это стеклянное волокно настолько тонкое в отличие от обычной стеклянной ваты, что оно не оказывает раздражающего действия; оно продается в аптеке, и клочок такой ваты легко скатать в комочек и вставить в ухо.

Другой тип вставляемого ушного протектора — заранее сформованная пластмассовая заглушка-пробка для уха. Такие заглушки изготовляют разных размеров, так как (если исключить некоторые «универсальные» изделия) важно добиться плотного прилегания заглушки. Необходимо также регулярно стерилизовать протектор. Одни типы заглушек неприятны для ношения, другие много лучше, и их можно носить хоть целый день. Остроумное устройство работает как клапан, закрывающий заглушку для звука, как только уровень шума переходит через некоторый предел, так что в условиях флуктуирующего уровня меньше соблазна вынуть заглушки, когда наступает тишина, после чего можно и забыть вставить их обратно.

Наружные ушные протекторы или наушники, в некоторых отношениях предпочтительнее, чем заглушки. Легче следить за тем, что их действительно носят; гигиенический вопрос здесь также стоит менее остро. Иногда они дают и большую защиту: они имеют пластмассовый наружный корпус, снабженный пенопластовой облицовкой и жидким уплотнением, которое легко возобновляется. Однако они имеют и недостатки — нагреваются и вызывают раздражение кожи при попадании под наушник твердых частичек.

Для очень сильных звуков, превышающих 130 дБ, недостаточны и наушники, так как вызываемые звуком вибрации черепа, во-первых, передают звук к внутреннему уху и, во-вторых, неприятны сами по себе. Как-то мне пришлось измерять шум гоночной машины в испытательной камере, когда шум достигал 150 дБ, а у меня были только наружные ушные протекторы. Резонансы костей и полостей лица были в высшей степени неприятны, и даже думать стало трудно (я хочу сказать: еще труднее, чем обычно!). В таких ситуациях необходимо надевать шлем, но даже тогда время нахождения в зоне сильного шума должно быть ограничено.

Часто все-таки очень трудно добиться защиты от шума при помощи ушных протекторов. В некоторой степени это связано с тем, что рабочие нередко предпочитают подвергаться значительному шуму, чем испытывать неудобства или неприятные ощущения от ношения ушных протекторов, а кроме того, не верят тому, что их слуху наносится ущерб, либо недооценивают степень этого ущерба. К сожалению, в некоторых кругах работу в условиях сильного шума считают чуть ли не геройством, и более старые члены таких сообществ даже щеголяют своей тугоухостью. Это ведет к тому, что на ношение ушных протекторов начинают смотреть как на проявление изнеженности. В результате таких физических и физиологических трудностей наниматель не может довольствоваться просто приобретением достаточного количества ушных протекторов и, раздав их, почить на лаврах, полагая, что его долг выполнен. Необходимо введение программы обучения, а еще лучше — организация целой схемы мероприятий по сохранению слуха,

Ношение ушных протекторов может даже улучшить условия звуковой связи, поскольку снижает уровень беспорядочного сигнала, достигающего уха, до уровня, при котором анализирующий механизм мозга способен лучше выделять осмысленные звучания. Однако усиливается опасность, что предупреждающие сигналы, как, например, звуки, издаваемые машиной перед аварией, могут остаться незамеченными, а в результате возможен несчастный случай.

В заключение отметим, что ношение ушных заглушек, или протекторов, решает задачу защиты от шума только тогда, когда защищаемый подвергается шумовому воздействию лишь в течение сравнительно малой доли полного времени работы механизма (в частности, если шуму подвергается вообще небольшое число людей, например эксплуатационный состав при наблюдении за механизированным процессом) либо когда остальные методы снижения шума неприменимы по техническим или экономическим причинам.

Акустическая диагностика и рецептура

Сколько б лекарств ни лежало в вашей акустической аптечке, все они будут бесполезны, а некоторые, пожалуй, и вредны, если вы не знаете, когда и какое из них нужно прописать. Быть может, наибольшим несчастьем, которое может вызвать ошибочный акустический диагноз, будут только проклятия директора-распорядителя, узнавшего о десятках тысяч фунтов, затраченных впустую. Но «недоучка хуже невежды», и если вы сейчас, захлопнув эту книгу, броситесь очертя голову решать ваши собственные запутанные акустические проблемы, то будьте осторожнее!

Эту главу можно было бы заполнить грустными историями об инженерах, не знающих разницы между поглощением и изоляцией звука или между изоляцией звука и теплоизоляцией. Путаницу не уменьшают и увлекающиеся создатели теплоизолирующих покрытий, которые часто называют свою продукцию «тепло- и звукоизоляционным материалом», тогда как они подразумевают под этим «теплоизоляционный и звукопоглощающий материал».

Акустическая диагностика требует много большего, чем умение отличать изоляцию от поглощения. В наше время большая часть акустических мероприятий проводится лишь в результате запоздалых соображений, и часто, когда инженер-акустик выходит на сцену, ему говорят: «Вот проблема устранения шума — что вы нам посоветуете?» Позвольте обратиться к моей собственной книге записей «историй болезни».

На одной фабрике шел монтаж пяти больших установок для сушки желатина. Каждая установка состояла из широкой трубы, вдоль которой перемещались гранулы желатина. На определенных интервалах

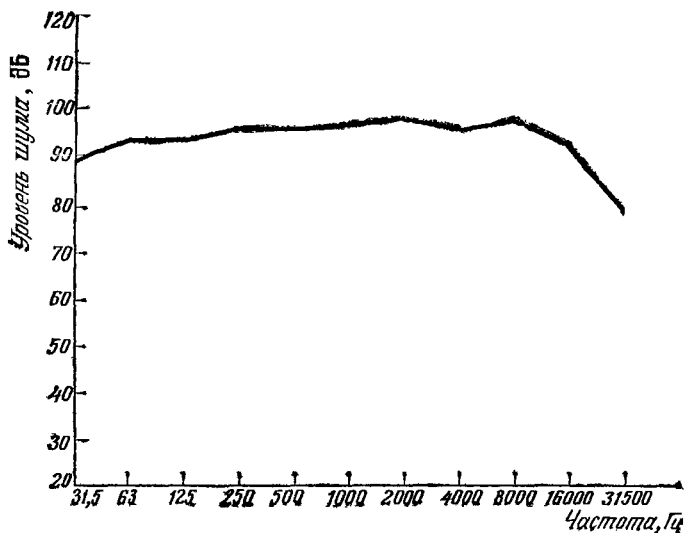


Рис. 57. Результат октавного анализа шума двух сушильных аппаратов.

в трубу подавался при помощи большого центробежного вентилятора постоянный поток горячего воздуха, который продувался кверху сквозь желатин. Отработанный воздух удалялся затем в вертикальном направлении в шести местах, но, поскольку он нес с собой частицы желатина, его приходилось пропускать через сепарационную систему. Эта система состояла из циклона — устройства, в котором поток воздуха закручивался, проходя через спиральную камеру, и попадал в конусообразный сосуд, где центробежная сила отбрасывала гранулы желатина на корпус сосуда, после чего они падали на дно, откуда клапан с электроприводом возвращал желатин в сушилку.

К моменту обследования в эксплуатации находились только две сушилки с их двенадцатью циклонами. В соответствии с гигиеническими требованиями поверхность стен была твердой, а значит, и хорошо отражающей звук; кроме того, был установлен подвесной потолок, также хорошо отражающий звук. Наибольший уровень шума был обнаружен на площадке между двумя сушилками, там он достигал

104 дБА; на других площадках, где шла постоянная работа, уровень шума составлял 97—98 дБА. Октавный анализ шума показал весьма равномерную частотную характеристику, как это видно из рис. 57, так что уровень шума существенно превосходил любой критерий риска повреждения слуха, соответствующий восьмичасовой непрерывной работе. Персонал располагал ушными протекторами.

Шум воспринимался как высокий широкополосный свист и никак не был локализован по направлению, поскольку всюду реверберационный звук преобладал над прямым. При помощи акселерометра были измерены вибрации на различных поверхностях, и вскоре стало ясно, что исходное возмущение вызывалось твердыми, как камешки, гранулами желатина, ударяющимися о корпус циклонов. Вибрации циклонов характеризовались тем же спектром, что и шум, и, согласно измерениям, значительно превосходили вибрации в любом другом месте на фабрике. Даже если принять во внимание малую поверхность циклонов по сравнению с корпусами сушилок, было ясно, что циклоны излучают гораздо больше шума, чем сушилки, к которым они были жестко присоединены. Возможность камертонного эффекта не означала, что исходное возмущение не было также местом наибольшего излучения. Шум от вентиляторов, всасывавших наружный воздух через входные трубы, был несуществен.

Ввиду строгих санитарно-гигиенических требований (все поверхности регулярно промывались горячей водой из шланга) было бы трудно придумать какой-либо способ покрыть звукоотражающие поверхности звукопоглощающим материалом, который, выполняя свое назначение, не сделался бы рассадником бактерий — уже не говоря о стоимости подобного мероприятия. С чисто акустической точки зрения снижение реверберации было бы весьма эффективно, поскольку коэффициент поглощения стен был настолько низок, что увеличить его во много раз не представило бы трудности. Но в этих условиях единственным выходом было предупреждение излучения шума от циклонов, поскольку для устранения исходного возмущения пришлось бы построить новые циклоны с упругими

стенками. Не оказалось бы эффективным и создание затухания в циклонах, потому что, хотя стенки циклонов, выполненные из нержавеющей стали, обладают малым внутренним трением, они приводятся в колебания ударами жестких гранул и повышение затухания ослабило бы звук всего на несколько децибел. Поэтому наилучшее лекарство здесь — применение звукоизолирующего микропористого покрытия или покрытия из минеральной шерсти, которое даст небольшое поглощение, с дополнительным наложением сверху воздухо непроницаемой обшивки из любого материала с поверхностной плотностью не менее 3 кг/м². При надежной заделке микропористого слоя или минеральной шерсти никаких нарушений санитарно-гигиенических правил не возникало, и в конце концов была применена фирменная листовая обшивка из поливинилхлорида на микропористой подложке, закрепление которой не представило затруднений.

С проблемой несколько другого характера пришлось столкнуться в конторе, окна которой выходили в световой колодец в центре здания. В ресторане — его кухня также выходила в этот колодец — имелась установка для кондиционирования воздуха с пятью конденсаторными агрегатами, расположенными на дне колодца. Конденсаторы имели цилиндрическую форму, и каждый из них был снабжен малым компрессором и теплообменником, а также осевым вентилятором диаметром 600 мм, который и являлся главным источником шума. На рис. 58 показаны результаты октавного спектрального анализа шума в конторе при открытых окнах. Следует обратить внимание на острый пик на частоте 63 Гц, из-за которого шум напоминал звук, издаваемый самолетом с поршневым мотором, что вовсе не характерно для данного вида шумового источника. При выключенных конденсаторах шум был значительно слабее.

Световой колодец имел в длину около 12 м и в ширину — 2,5 м, а стенки его были образованы сильно отражающими звук стенами и окнами здания. Как и во всех относительно малых помещениях, в колодце существовал набор собственных колебаний, подобных тем, о которых мы говорили в гл. 9. На беду высота звука вращения вентиляторов — 75 Гц — лежала вбли-

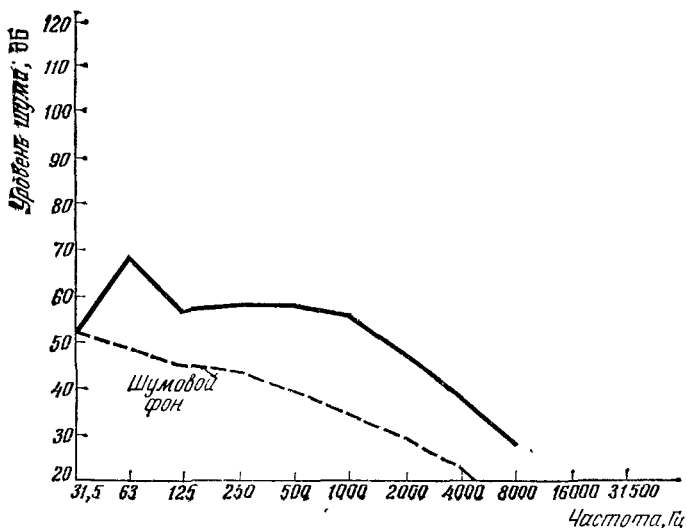


Рис. 58. Результат октавного анализа шума в служебном помещении.

зи резонансной частоты одного из продольных собственных колебаний колодца. Это имело два последствия: во-первых, возникала стоячая волна, значительно усиливающая амплитуду колебания на частоте 75 Гц в местах пучностей (см. рис. 7). Во-вторых, ввиду неточного совпадения частоты стоячей волны с частотой тона, издаваемого вентилятором, при его включении между этими двумя тонами возникали медленные биения, поскольку разность фаз между тонами медленно менялась, и оба колебания происходили то синфазно, то противофазно. Это обстоятельство еще более усиливало мешающее действие звука.

Оборудовать конденсаторы поглощающими глушителями — дело не легкое. Нетрудно было установить сверху цилиндрический облицованный глушитель с центральным поглощающим телом; так как, однако, воздух всасывается по всему периметру у основания каждого агрегата, для снижения шума потребовался бы сложный глушитель, изготовленный по специальному проекту.

Хотя наличие стоячей волны придавало проблеме особую остроту, оно же и спасало положение, потому что можно было сразу получить большой выигрыш, подавляя эту волну. Для этой цели поперек светового колодца был установлен экран трехметровой высоты, изготовленный из листа мягкой стали нормального калибра 20¹, облицованного с обеих сторон слоем минеральной шерсти толщиной 50 мм; облицовка прижималась перфорированным металлическим листом. Экран располагали так, чтобы он разделял колодец по длине на два участка, размеры которых не находились в простом арифметическом отношении.

Этим способом добились тройного эффекта. Во-первых, все собственные частоты обеих секций светового колодца поднялись до значений, много больших частоты шума вращения вентиляторов; во-вторых, наличие поглощающих стенок экрана ограничивало возможные амплитуды стоячих волн до пренебрежимой величины; в-третьих, окно конторы оказалось заслоненным экраном от конденсаторов, так что до окна доходил только шум, дифрагированный на верхней кромке экрана. Удалось рассчитать и эту долю шума, учитывая наличие других отражающих стенок.

В результате шум конденсаторов в октавной полосе 63 Гц был снижен до значения, меньшего уровня шумового фона (показанного на рис. 58 штриховой линией), более чем на 16 дБ. Вряд ли такого результата удалось бы добиться путем установки глушителей на входных и выходных трубах конденсаторов, поскольку поглощающие глушители особенно плохо работают на низких частотах.

Разумеется, в сельской местности жители весьма чувствительны к шуму, и их жалобы на шум фабрики, пожалуй, никогда не прекратишь, пока не уберешь саму фабрику; это обусловлено тем, что весьма часто жалоба на шум только отражает другую, основную, причину недовольства: сам факт нежелательного соседства с предприятием. Недавно, впрочем, пришлось иметь дело со случаем, когда причина для жалоб была вполне реальна. На участке, предназначенном для лег-

¹ Нормальный калибр 20 соответствует толщине листа 0,9 мм. — *Прим. ред.*

кого промышленного строительства, был построен химический завод.

К сожалению, планирующие власти сочли возможным дать разрешение на постройку бунгало на участке земли, который, как оказалось, лежал непосредственно за оградой этого завода.

Неудачливый владелец бунгало круглосуточно подвергался воздействию самых разнообразных промышленных шумов. Для начала упомянем два больших поршневых компрессора, создававших верных 88 дБ снаружи дома; этот шум частично лежал на основной частоте компрессоров, вне области восприятия звука (он вызывал, однако, вибрации стекол в окнах и даже крыши), но много шума приходилось и на октавные полосы 31,5 и 63 Гц. Далее, домовладелец получал 58 дБ на частоте 1 кГц от какого-то вентилятора, обслуживавшего помещение компрессора, да еще столько же на частоте 4 кГц от длинных участков газопровода высокого давления, снабженного несколькими шаровыми клапанами.

Возникала и другая проблема: шум на территории завода и вблизи него попадал в диапазон уровней возможного повреждения слуха. Хотя источники шума не находились в замкнутом пространстве, тем не менее возникало достаточно отражений, образующих полуреверберационное звуковое поле, так что определить источники высокочастотного шума по слуху было невозможно. В этом случае снова измерение вибраций различных поверхностей, выполненное сначала на слух при помощи одного варианта стетоскопа, известного под названием тектаскоп, затем — при помощи акселерометра и шумомера, позволило установить, что шум исходит из участка трубы между выхлопным клапаном и выхлопной трубой. Выхлопная труба была снабжена стандартным для подобных установок реактивно-поглощающим высокочастотным глушителем, состоящим из конической камеры, заполненной кольцами из нержавеющей стали.

Звукоизолирующее покрытие на клапанах и трубах снизило шум на 19 дБ при частоте 4 кГц, но, поскольку трубопровод был жестко связан с конструктивными элементами здания, чистый тон, генерируемый поперечными колебаниями газа в трубе, попадал

в эти элементы и излучался такими поверхностями, как рифленые листы перекрытий. Сами опорные кронштейны также давали значительное излучение. Можно было принять меры акустического характера: установить поглощающий глушитель ниже клапана, что позволило бы обойтись почти без изолирующей обшивки и решило бы проблему излучения конструкции. Однако инженеры не пожелали пойти таким путем, и пришлось применить упругие кронштейны по всей длине трубы.

Шум компрессора сводился целиком к шуму всасывания. Пульсации потока воздуха в большом низкооборотном компрессоре содержали гармоники, лежащие внутри диапазона слышимости. Из экономических соображений компания решила не приобретать типового фирменного глушителя; располагая собственными гибочными и сварочными агрегатами, она спроектировала и построила специальный реактивный глушитель, состоящий из большого цилиндра, разделенного на два резонатора, имеющих вид расширительных камер; кольцевое пространство между ними образовывало ответвленный резонатор, сообщающийся с центральной перфорированной трубой, участки которой, лишённые перфораций, простирались до половины расширительной камеры с каждой стороны.

В результате этих мероприятий шум в месте расположения бунгало был снижен до неслышимого уровня. После этого сравнительно простая задача борьбы с шумом осевого вентилятора компрессорного помещения свелась к установке круглого поглощающего глушителя, облицованного 50-миллиметровым слоем минеральной шерсти и снабженного центральным поглощающим телом. Сопротивление потоку воздуха, создаваемое глушителями, лишь незначительно уменьшило объем подаваемого воздуха.

Во всех описанных случаях ошибочный диагноз привел бы к большим финансовым убыткам. Ошибкой было бы снабжать циклоны звукопоглощающим, а не звукоизолирующим покрытием либо начать проводить обширную акустическую обработку сушилок или других участков установок, даже не установив, что за шум ответственны именно циклоны. В случае

со световым колодцем незнание эффектов стоячих волн привело бы к весьма трудным и дорогостоящим попыткам подавать воздух в конденсаторы через воздухопроводы с глушителями, а также заглушать выходную трубу — хорошо, если бы все это хотя бы на 10 дБ снизило шум. На химическом заводе хозяева были уже готовы приспособить второй глушитель у основания выхлопной трубы, хотя источник неприятности находился много выше по течению. Чтобы снизить шум компрессоров, часто пытаются применить поглотители звука, однако при таких низких частотах они практически бесполезны, если только нет возможности построить пластинчатый глушитель больших размеров. Поскольку на входе таких компрессоров почти отсутствует шум на средних и низких частотах, установка подобного пластинчатого глушителя была бы большой и непроизводительной затратой.

Кустарные попытки снижения шума на заводах часто приводят к лишним хлопотам. Владелец одного крупного автомобильного завода пытался справиться с шумным пылесосом в литейном цехе при помощи трехстороннего акустического экрана, который обошелся ему в 4000 фунтов стерлингов. Будь экран на метр выше, он дал бы небольшой эффект в одном направлении, но это повышение сделано не было, а так как экран был изготовлен просто из обычных перегородок, устанавливаемых в конторских помещениях, и поглощающие материалы не применили, то в итоге положение только несколько ухудшилось, так как стенки, расположенные вокруг механизма, отражали звук.

Аналогичная ситуация, но в значительно уменьшенном масштабе встретилась мне в приквартирном гараже под жилым помещением, где шум создавался небольшим электрическим насосом. В жилое помещение шум проникал как по воздуху, так и по стенам. Пытаясь улучшить положение, вокруг насоса соорудили дощатый ящик, выложенный фибровым картоном, но стенки ящика соприкасались с насосом, что улучшало условия излучения звука: уровень шума в октаве 125 Гц поднялся на 2 дБ. Под машиной поместили резиновую подстилку; разумеется, тонкий слой резины не обладал достаточной податливостью, но

мало того — трубопровод насоса по-прежнему жестко соединял насос с полом и стенами!

Иногда вы можете досыта надавать рекомендаций, и все безуспешно, потому что монтажники понятия не имеют о мерах борьбы с шумом, не знакомы с самими устройствами и не понимают их действия. Некий подрядчик по вентиляционным системам установил одну из них в небольшой конторе, расположив оборудование в незанятом помещении над потолком конторы, изготовленным из стеклянных панелей. В этом случае не только следовало применить пластинчатые глушители в воздуховодах, но и было совершенно необходимо добиться полной механической изоляции вентилятора от структурных элементов постройки. То, что какие-то акустические мероприятия необходимы, сообразили уже после окончания работы; пришлось разработать новый проект монтажа опорной плиты вентилятора и мотора. К сожалению, мастера, выполнявшие переделки, хотя и установили antivибрационные крепления, оставили на месте болты, крепившие опорную плиту к балкам перекрытия!

А вот еще один пример крушения надежд, также связанный с монтажом вентиляционной установки. По различным причинам оказалось необходимым нанести на некотором участке воздуховода, изготовленного из листового металла, звукопоглощающую облицовку в виде 50-миллиметрового слоя микропористого материала на специальной подложке. К сожалению, установщики-монтажники обладали чрезмерной долей здравого смысла и пришли к похвальному заключению, что протекание воздуха улучшится, если установить акустическую облицовку подложкой внутрь воздуховода, вместо того чтобы приклеивать подложку к металлу. Какому-то несчастному пришлось потом ползать вдоль воздуховода, отдирая поглощающий слой от стенок собственными ногтями.

Однажды я с тяжелым сердцем посетил один завод, главный инженер которого сообщил мне, что он консультировался с многими специалистами по акустике, но все их предложения были бесполезны. Оказалось, что шум создавался множеством различных источников и что стены помещения хорошо отражали звук; поэтому все консультанты рекомендовали вме-

сто топорных кожухов для каждого из сложных шумящих механизмов установить звукопоглощающие покрытия на потолке и в дополнение к этому мероприятию (или в замену его) установить звукопоглощающие панели на стропильных фермах под крышей. Увы, главный инженер решил сделать пробный шаг и обработал только один потолочный пролет, а потом удивлялся, почему нет никакого эффекта. Ясно, что жалкое увеличение поглощения, создаваемое малым обработанным участком поверхности, даже не приближалось к удвоению суммарного поглощения энергии, которое требуется для понижения уровня реверберационного звука на 3 дБ.

Я уже упоминал в этой книге о применении перфорированных экранов — этот случай, к сожалению, действительно имел место. Людям нравится идея малых отверстий, отсасывающих звук, и я видел механизмы, снабженные только перфорированной панелью, иногда еще для полноты картины оклеенной с обратной стороны звукопоглощающей прослойкой. Ни то, ни другое, конечно, не приводило к заметным результатам, но расходов эти мероприятия требовали; это снова подтверждает необходимость еще большей популяризации акустической науки.

Многошумное будущее

Что ожидает нас в будущем в мире, полном шумов? Принесет оно тишину или еще больше шума? Какими новыми способами можно будет бороться с шумом?

Мы всегда должны помнить, что тишина стоит денег. Это значит, что ни один изготовитель механизмов, автомашин или самолетных двигателей не займется снижением шума просто из соображений филантропии.

Даже сейчас те шаги, которые сделаны на пути конструирования более тихих турбовентиляторных двигателей, не улучшают автоматически условий жизни людей на земле. Дайте оператору авиалинии менее шумный самолет, и он немедленно прикажет летчикам давать полный газ сразу после взлета, если ему удастся удержаться в пределах норм, ограничивающих уровень шума вблизи аэропорта.

Изготовитель механизмов попытается снизить шумность своей продукции лишь в том случае, если его вынудит к этому закон либо если потребитель предпочтет более тихие механизмы и выберет конкурирующую продукцию, потому что она создает меньший уровень шума. Но и покупатель не станет платить лишнее за менее шумящий механизм, если на то не будет серьезной причины. Такие серьезные причины существуют, но их надо выставить на всеобщее обозрение. И даже тогда потребуются законодательные меры, прежде чем что-то сдвинется с места.

В действительности основная проблема — отсутствие сведений. Воздействие шума понимают не в полной мере, и некоторые отказываются верить, что шум может как-то повредить их слуху. Быть может, еще

более существенно то, что конструкторы, за малыми, но важными исключениями, если и располагают кое-какими сведениями по акустике, то в своей работе просто забывают о них. В каждом из примеров, которые мы привели в предыдущей главе, необходимость акустической обработки была понята с опозданием, потому что *никто не отдавал себе отчета* в том, что данное устройство создаст проблему шума. На стенке каждого конструкторского бюро следовало бы вывесить плакат с надписью: «Как будут обстоять дела с шумом?» Приглашение специалиста-акустика для ознакомления с чертежами обойдется всего в несколько фунтов стерлингов, но это окупится сторицей, если выпускаемый продукт будет производить меньше шума. Ведь намного дешевле предусмотреть снижение шума в исходном проекте, чем приняться за дело и штопать дырки, когда уже поздно что-либо поправить.

Акустика не слишком трудная дисциплина; раз и навсегда усвоив основные понятия, можно сделать очень многое, руководствуясь просто здравым смыслом. Теперь уже есть немало искусных и опытных специалистов, как в университетах, так и в консультативных бюро, которые охотно примут участие в работе конструкторов. Появилось множество производителей акустического оборудования и акустических материалов, предлагающих не только превосходную продукцию, но и свой большой опыт. Спрос на продукцию все больше зависит от ее шумовых свойств. Слово «шум» все чаще появляется в рекламах автомашин, и от изготовителей машин теперь наряду с другими техническими показателями требуют данных об уровне шума.

Чего следует ожидать от технического прогресса? Что можно сказать о шуме механизмов будущего? Шум самолетов лишь немного уменьшится по сравнению с шумом трехмоторных реактивных самолетов нового поколения, потому что уже сейчас шум двигателей лишь незначительно превосходит шум обтекания корпуса самолета. Однако условия вблизи аэропортов будут значительно улучшаться по мере вытеснения сильно шумящих самолетов старого типа. Если когда-либо в небе появятся самолеты с вертикальным

летом, картина распределения шума вокруг аэропорта изменится кардинально: шум в непосредственной близости возрастет, но, поскольку самолет будет достигать большой высоты на меньшей дистанции, жители, удаленные от аэропорта на средние расстояния, окажутся в выигрыше. Те же, кто проживает далеко от аэропорта, вероятно, не заметят существенной разницы.

Существует серьезная опасность значительного увеличения шума дизельных двигателей; это вызвано усовершенствованием литейного производства, позволяющим уменьшать толщину отливки в местах, испытывающих малые напряжения. Уменьшение толщины стенок картера до 5 мм приводит к непропорционально большому росту излучения шума. Существенная часть необходимых исследований по шуму двигателей уже выполнена, и давно шум выхлопа можно заглушить вполне удовлетворительно. Дело только в стоимости мероприятий; но пока либо потребитель, либо закон не заставят изготовителей принимать меры по снижению шума, для них было бы самоубийством удорожать продукцию, если сбыт не зависит от того, насколько заглушены механизмы.

Во всех отраслях промышленности наблюдается стремление облегчить конструкции. А это означает не только меньшую массу, но и меньшую звукоизоляцию, многослойные же перегородки легкого веса дороги. Необходимо до конца усвоить, что теплоизоляция и звукоизоляция — разные вещи. В строительной промышленности исследования ведутся непрерывно, и в этой области нет недостатка в знании дела. Скоро можно будет прямо получать «упакованную звукоизоляцию» для дома, как сейчас получают установки центрального отопления; цена возрастет процентов на 10. Сюда войдут двери с уплотнением, двойные рамы для окон, обеспечивающие не только тепло-, но и звукоизоляцию, заглушенная вентиляционная система, звукоизолирующая крыша и, может быть, звукопоглощающие потолки в помещениях. В местах, где нежелательна тяжелая каменная кладка, могут быть применены двух- или трехслойные тонкие перегородки с упругой подвеской.

Безусловно, в некоторых областях в результате применения новых материалов можно ожидать улучшения. Пластмассы обладают значительно большим внутренним поглощением, чем сталь; уже упоминалось о возможности использования углеродных нитей в лопастях компрессоров самолетных двигателей. Будет появляться все больше автомашин с пластмассовыми корпусами, которые до сих пор не получили еще широкого распространения частично из-за того, что в металлообрабатывающую промышленность вложены огромные капиталы. Конечно, пластмасса обладает меньшей массой, чем сталь, и, если нанести на стальной лист демпфирующий слой, получится хороший звукоизолятор. Однако в автомашинах единственное место, где изоляция звука важнее, чем его поглощение, — это перегородка салона. Будет вполне возможно применять либо нагруженный пластмассовый листовый материал, как это делают для некоторых автомашин высшего класса, либо нагружать пластмассовую перегородку только в ответственных местах. Главной проблемой останется недостаточная изоляция пластмассового корпуса по отношению к внешнему шуму: водителю придется несладко, когда он окажется в сплошном потоке тяжелых дизельных грузовиков, ревущих на него со всех сторон.

Вероятно, крупнейшее изменение в господствующий ныне акустический климат внесет переход на другие первичные двигатели. Дни поршневого двигателя внутреннего сгорания сочтены, даже если конец ему придет еще не скоро. Когда электрический способ продвижения укрепитя по-настоящему, он принесет с собой наибольшее снижение шума, не говоря уже о снижении других видов загрязнения окружающей среды. В настоящее время все зависит от тех, кто разрабатывает аккумуляторы: электромобили не смогут привлечь к себе внимание, пока не станет возможным проехать без перезарядки не менее 60 км со скоростью свыше 70 км/час. Уже сейчас этого было бы вполне достаточно для внутригородского транспорта. Если исключить транзитный транспорт, это позволило бы изгнать двигатель внутреннего сгорания из центральных частей города, не считая, конечно, случаев перевозки особо тяжелых грузов в город или из него.

Какими приятными стали бы города, если бы шума там было мало, выхлопных газов не было бы совсем и для всех хватало бы мест на стоянках. Электромобили не вполне бесшумны, гудение электромотора и шум передачи останутся, но с ними можно будет справиться, если конструкторы внесут в свои проекты хоть малую толику акустических знаний.

Другой вид первичного двигателя — газовая турбина. Пока этот двигатель имеет некоторые технические недостатки, но их, несомненно, удастся устранить. Газовая турбина создает, быть может, не меньше шума, чем обычный двигатель внутреннего сгорания, но с ее шумом легче справиться. Реактивной струи здесь нет, отсутствуют также все низкочастотные пульсации, вибрации и глухие удары, характерные для дизельных двигателей. С высокочастотным шумом газовой турбины бороться гораздо легче. Почти все методы снижения шума весьма малоэффективны на низких частотах.

Что касается воздушного транспорта, то еще весьма нескоро мы увидим (а лучше сказать — услышим) что-нибудь отличное от той или другой модификации турбовентиляторного двигателя. Как только пытаешься думать о следующем поколении авиационных двигателей, попадаешь прямо в область научной фантастики. Мне известна группа людей, деятельно работающих над тем, что они называют «антигравитационным устройством», но если им что-нибудь удастся сделать, то это будет нечто выходящее за пределы современной физики. Было бы соблазнительно суметь «выпрямить» переменную силу, создаваемую парой вращающихся в противоположном направлении эксцентричных тел, — безразлично, будь то куски свинца или электроны. Есть малоэффективный способ осуществить такое движение: нужно поместить вращающееся тело в какое-либо средство передвижения, которое бы легче перемещалось вперед, чем назад. Но как применить эту идею для полета в воздухе или в космическом пространстве — не могу придумать! Конечно, наука еще не сказала своего последнего слова; может быть, мы увидим и антигравитационные устройства, и, если они будут достаточно тихими (какой удар, если устройства окажутся шумящими!), одна

из важнейших проблем снижения шума будет решена. У меня лично на это мало надежды...

Несколько ближе к реальности, хотя явно не пригодно ни для каких целей, кроме межпланетных путешествий, это решение проблемы продвижения при помощи электрической реактивной машины. Современная авиация и межпланетные корабли используют реакцию, возникающую при ускорении массы. В реактивных самолетах ускоряют смесь воздуха с продуктами сгорания топлива, в космических аппаратах, работающих в безвоздушном пространстве, — только горячие газы. Электрическая реактивная машина должна ускорять и отбрасывать от себя электроны с их ничтожной массой, и здесь можно ожидать реакции, не превышающей по мощности сильного рукопожатия.

Разумеется, для космических целей долговечность двигателя важнее его мощности; после нескольких лет движения с малым ускорением в вакууме можно разогнаться до большей скорости, чем после нескольких часов бешеного горения. Но ничтожная мощность делает такие двигатели совершенно непригодными для воздушного или наземного транспорта. Нет шансов, чтобы журналы для автолюбителей стали рекламировать устройства, которые набирают скорость от нуля до 100 км/ч за время, равное примерно 120 000 с!

Новинкой в области первичных двигателей явилось бы устройство, которое использовало бы энергию сжатых и растянутых *твердых тел* вместо энергии сжатых газов в обычных двигателях. Поршневой двигатель, построенный на этом принципе, был бы гораздо тише, чем газовый. Во-первых, его скорость была бы настолько мала, что шум, появляющийся вместо шума сгорания топлива в обычных двигателях, лежал бы в неслышимой области, а излучение его было бы также очень мало. Если к этому добавить еще магнитные подшипники, разработка которых находится еще в самой начальной стадии, такая машина заслужила бы название «бесшумный двигатель». А устройства типа магнитных подшипников можно было бы с пользой применить и на существующих двигателях, и уж, конечно, акустика не единственная область, заинтересованная в них.

Несомненно, появятся новые дешевые материалы, удовлетворяющие самым высоким акустическим требованиям и удобные для практических применений. Высокопоглощающие, податливые и многослойные материалы находят широкое применение; увеличение удельного поглощения позволит в большой степени сохранить конструктивно важную жесткость. Типичный пример — сильно задемпфированный стальной лист, покрытый слоем на основе смолы, армированным в свою очередь тонким стальным листом, что создает при вибрациях большое поглощение. Ранее в этой книге говорилось, что изготовление такого материала связано с некоторыми трудностями, но они в конечном счете будут преодолены. Разумеется, такой задемпфированный лист всегда будет много дороже обыкновенного стального листа. Все это, конечно, не произведет переворота в данной области.

Есть, однако, еще один путь, до сих пор еще практически не испытанный. Все, о чем мы говорили, наводит на мысль, что борьба с шумом — весьма пассивное занятие. Мы обычно рассчитываем на использование реакции массы или реакций другого типа (термин «реакция» следует понимать в физическом, а не в химическом смысле слова). Падающая волна либо сама доставляет энергию, необходимую для того, чтобы загородить себе путь, либо использует для этой цели что-нибудь столь простое, как инерция.

Если действительно будет сделан решающий шаг в направлении борьбы с шумом, то уж, вероятно, путем создания искусственной реакции по отношению к звуковым волнам. Существуют два-три способа, которыми эта задача может быть решена, и кое-какие эксперименты, правда в малом масштабе, уже выполнены. Первая возможность весьма привлекательна: она заключается в создании «антизвука», который уничтожит звук в результате деструктивной интерференции с ним.

Антивещество состоит из атомов, частицы которых имеют заряд противоположного знака по отношению к частицам обычного вещества и сами по себе не отличимы от последних. Только при встрече этих частиц друг с другом происходит их взаимное уничтожение, или аннигиляция. Колебания давления в антизвуке

противоположны по знаку колебаниям давления в звуке. В отдельности антизвук не будет отличен от звука, но при встрече они уничтожат друг друга.

Все это звучит замечательно, но здесь есть подвох. Легко излучить антизвук, просто принимая звук при помощи микрофона и воспроизводя его с обратным знаком. Но создать антизвук с той же пространственной формой волны, что и звук, так чтобы равные колебания давления противоположного знака создавались в нужных местах и в нужные моменты времени, — вот это почти невозможно. Возьмем простой сферический источник звука, например пульсирующий баллон из гл. 2. Для того чтобы воспроизвести идентичный сферический волновой фронт антизвука, который уничтожил бы звук, создаваемый баллоном, потребуется расположить источник антизвука в самом центре баллона. Это как раз можно было бы осуществить, но пульсирующие ли баллоны заставляют нас проводить мучительную ночь без сна? А если взять вместо баллона более сложное устройство, излучающая поверхность для антизвука должна будет иметь ту же форму и занимать то же место, что и сама шумящая машина¹.

Можно добиться частичного успеха, если, оставив попытки уничтожить звук, излучаемый во всех направлениях от источника, удовольствоваться созданием хотя бы небольшой полоски тишины. Это происходит и без активного вмешательства, когда в результате интерференции между падающей и отраженной волнами образуется стоячая волна (см. рис. 6). В этом случае отраженная волна играет роль антизвука для волны простой формы, и в ряде точек эти волны гасят друг друга, так что в таких точках звука совсем или почти нет. К сожалению, это точки в буквальном смысле слова, и, даже если поместить ухо точно в такую точку, звук будет слышен из ее окрестности. Весь эффект, кроме того, будет испорчен тем, что другое ухо окажется вне тихого места, за исключением случаев простых тонов, длина волны которых

¹ Можно показать, что последнее условие не обязательно в качестве излучающей антизвук поверхности можно взять любую замкнутую поверхность, внутри которой находится шумящий объект. — *Прим. ред.*

подобрана так, чтобы можно было одновременно попасть одним ухом в одну, а вторым — в другую тихую точку. Имея в виду, что снижение уровня звука на 20 дБ соответствует уменьшению звукового давления на 90%, заключаем, что для получения удовлетворительного эффекта взаимное погашение волн должно быть почти полным.

Создавая фронт антизвуковой волны, ближе подходящий по форме к фронту исходного звука, можно значительно расширить области тишины. При взаимодействии падающего и отраженного звуков область тишины мала, потому что при сферической падающей волне и плоской отражающей поверхности фронты искривлены в противоположных направлениях и поэтому наиболее резко отличаются друг от друга. Кроме того, эффект гашения вообще заметен только для гармонического звука. При искусственном создании антизвука и более близком воспроизведении фронта исходной волны можно значительно увеличить области тишины, а искусственное создание антизвука устраняет необходимость ограничиваться только гармоническими волнами. Синтезировать можно волны с любой временной зависимостью, а при необходимости для получения желательного соотношения фаз можно включить в устройство генерации антизвука линии задержки.

Один из способов внесения искусственной реакции может найти применение в звукоизолирующих перегородках. Построив перегородку и выяснив виды ее колебаний на различных частотах, можно установить в пучностях (то есть точках наибольшего смещения) электромагнитные вибраторы. К сожалению, их потребуется множество и для каждой частоты их расположение должно быть другим. Затем при помощи сетки микрофонов, помещенных на небольшом расстоянии перед панелью и «разведывающих» форму волны, приближающейся к стенке, можно передать сведения о фронте волны в устройство задержки времени и далее в вибраторы, так чтобы создать в панели напряжения, равные по величине и противоположные по знаку тем, которые создаст падающая на панель звуковая волна. Разумеется, применимость этого метода весьма ограничена хотя бы вследствие

его большой сложности и высокой стоимости электронного оборудования. Потребуется немалая исследовательская работа даже для того, чтобы создать лабораторную модель такого устройства. Достаточно упомянуть, что панель и вибраторы придется установить на необычно жесткой раме, чтобы эффективность устройства не лимитировалась такими факторами, как масса вибраторов, а это имеет смысл только для высоких частот. На высоких частотах и при наклонном падении волны на панели одновременно будет возбуждаться несколько стоячих волн, что частично позволит преодолеть последнюю проблему, но потребует значительно большего числа вибраторов. Надежды на такое решение вопроса возникнут лишь с появлением достаточно простого электронного оборудования, да и тогда расходы на подобную установку редко смогут быть оправданы.

Однако электронику уже применяют с успехом для улучшения акустических свойств концертных залов. Так, если при проектировании помещения оказывается трудно получить достаточно большое время реверберации, то применяют систему «искусственной реверберации». В принципе это достигается путем электрического воспроизведения звука на выбранных частотах при помощи громкоговорителей, размещенных в существенных для эффекта точках помещения, но эффект оказывается совершенно отличным от действия простой системы усиления звука. В другом варианте используется устройство, обеспечивающее временную задержку, и исходный звук многократно повторяется со все уменьшающейся амплитудой, имитируя эффект отражений от стен помещения. Последний способ оказывается полезным для малых студий звукозаписи с сильно заглушенными стенами, в случаях когда желательно воспроизвести эффект большого зала или другого подобного помещения.

Проблема искусственной реакции и антизвука представила бы несколько меньше трудностей в таких областях, как глушение звука выхлопа: размеры «волновода» в этом случае настолько малы, что приходится иметь дело только с плоской волной, и поэтому заботы о форме фронта волны снимаются. В этом случае проблемы связаны скорее с темпера-

турой, коррозией и вообще с тяжелыми условиями работы с тонкой аппаратурой. Стоимость снова будет устрашающей, а обычные глушители и так работают неплохо.

Когда я выступаю с лекциями, мне часто задают вопрос, почему никто не использует в качестве изолятора для звука вакуум: на уроках по физике в пятом классе все наблюдали, как ослабевает звон колокольчика, помещенного под колокол воздушного насоса, при откачивании воздуха. Конечно, совершенно справедливо: звук не может существовать в вакууме. Но вакуум не только один из самых дорогих способов получения «ничего» за ваши деньги (тут, впрочем, есть немало сильных конкурентов), но он также требует, чтобы его заключили во что-то, точнее, исключили из чего-то.

Двойная панель с промежутком, в котором создан вакуум, не будет особенно эффективной потому, что звук будет проходить, как по мостикам, по элементам конструкции, удерживающим пластины панели на известном расстоянии друг от друга. Даже если эти мостики удастся сделать податливыми и получить 90% изоляции, то все же это не представит преимущества по сравнению с обычными перегородками. Я не вижу особой будущности для панелей с «вакуумной набивкой». Думаю, что если появится механизм, который можно будет поместить в достаточно прочную камеру, откуда откачан воздух, и удерживать его в пространстве при помощи электромагнитной подвески, то, действительно, заботиться о шуме этого механизма не придется. Но возникнет другой вопрос: какой прок от столь надежно заизолированного механизма?

Впрочем, никаких чудес не требуется для того, чтобы при нынешнем состоянии техники достигнуть надежных и значительных успехов в борьбе с шумом. В самом деле, большое сокращение шума может дать возвращение к некоторым идеям девятнадцатого века: на свет снова выходят паровая машина и двигатель Стирлинга, оснащенные современной технологией. Так как в этих механизмах нет взрывов в цилиндрах, то их возрождение обещает столь желанное снижение шума.

Ожидаемая революция в области борьбы с шумом связана не столько с технологическими проблемами, сколько с приоритетом работ в этой и других областях. Ныне конструктор или планировщик должны начинать не с деталей, касающихся требуемой мощности, или строительного оборудования, а с ограничений, налагаемых условиями окружающей среды. Эти ограничения должны включать не только то, что видно и простым глазом, но и то, что не увидишь на чертежной доске, — я говорю об уровне шума. Только тогда можно продолжать проектирование устройства, и целью должно быть удовлетворение всем техническим требованиям, но не в ущерб окружающей среде. Охрана окружающей среды обходится технически развитым странам в огромные суммы. Мы можем добиться тишины, если мы ее пожелаем, но платить за нее нам придется наличными.

АКУСТИЧЕСКИЙ — имеющий свойства или характеристики, действующие на звук или связанные со звуком: «акустические плитки», но не «акустический инженер» (если речь только не идет о коэффициенте поглощения звука инженером!).

АМПЛИТУДА — максимальное значение колеблющейся величины.

АУДИОГРАММА — график, вычерчиваемый (обычно автоматически) *аудиомером*, дающий характеристику слухового восприятия или величину потери слуха испытуемого в функции от частоты. Обычно строится отдельный график для каждого уха.

АУДИОМЕТР — прибор для получения (обычно автоматического) *аудиограммы*, создающий калиброванный сигнал в каждом телефоне и отмечающий на графике уровни, на которых испытуемый подает знак, свидетельствующий о появлении или исчезновении слышимости.

БЕЛ — десять *децибел* (обычно не применяется).

БИЕНИЯ — периодические усиления и ослабления амплитуды, вызываемые *суперпозицией* двух тонов различной частоты. Частота следования биений равна разности частот тонов.

БИНАУРАЛЬНЫЙ — использующий способность слушать двумя ушами, например с целью определения дистанции или направления. Термин применяется также и при электронном моделировании этого процесса.

БОЛЕВОЙ ПОРОГ, ИЛИ ПОРОГ ОСЯЗАНИЯ — минимальный *уровень звукового давления* на данной частоте, воспринимаемый испытуемым как боль в ухе.

ВОЗБУЖДЕНИЕ, ИЛИ ВОЗМУЩЕНИЕ — вынужденное изменение давления, положения или другой характерной величины.

ВОЛНА — упругое возмущение, распространяющееся в среде.

ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (ρc) — мера, характеризующая среду, передающую звук, и равная отношению *эффективного звукового давления к эффективной скорости частиц*. Оно равно произведению плотности « ρ » на скорость звука в среде « c ».

ВОЛНОВОЙ ФРОНТ — поверхность, образованная всеми точками, в которых *фаза волны* имеет одно и то же значение.

ВОСПРИНИМАЕМЫЙ УРОВЕНЬ ЗВУКА (P_N дБ) — уровень звукового давления случайного шума в полосе от одной трети октавы до одной октавы в окрестности частоты 1000 Гц, соответствующий, по оценке «нормальных» слушателей, громкости рассматриваемого шума.

ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ — промежуток времени после выключения источника звука, в течение которого реверберационный звук данной частоты ослабевает на 60 дБ. Обычно измеряют время для первых 30 дБ ослабления и экстраполируют результат.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ИЛИ ВИБРАЦИИ — *колебания* или вибрации, поддерживаемые путем сообщения пульсирующего потока энергии (см. также **СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА**).

ВЫСОТА ЗВУКА — характеристика слухового восприятия, позволяющая распределить звуки по шкале от низких до высоких звуков. Зависит преимущественно от *частоты*, но также от величины звукового давления и формы волны.

ГАРМОНИКА — *синусоидальная* компонента (чистый тон) сложной периодической волны, частота которой составляет целое кратное *основной частоты* волны. Компоненту («обертон») с частотой, вдвое большей основной частоты, называют второй гармоникой.

ГАУССОВО (ИЛИ НОРМАЛЬНОЕ) РАСПРЕДЕЛЕНИЕ — термин, применяемый в статистике для

описания величины и частоты встречаемости ошибок. Важнейшие характеристики — наиболее частая встречаемость событий в центральной (средней) точке или вблизи нее, прогрессивное убывание встречаемости событий при удалении от центра и симметрия распределения по обе стороны от центра. При *случайном шуме* каждую флуктуацию амплитуды считают событием, независимо от того, лежит ли она выше или ниже среднего значения. Пиковое значение каждой флуктуации эквивалентно ошибке, и распределение ошибок с течением времени — гауссово.

ГЕРЦ (Гц) — см. ЧАСТОТА.

ГРАДИЕНТ — изменение локальной скорости звука с изменением высоты над уровнем земли или с изменением какого-либо другого расстояния, приводящее к рефракции звука. Чаще всего вызывается повышением или уменьшением температуры с высотой или различиями в скорости ветра.

ГРОМКОСТЬ — суждение об интенсивности звука, выносимое человеком на основании слухового ощущения; зависит от звукового давления и частоты. В значительной части диапазона слышимости утроение звукового давления, что почти равно 10 дБ, можно считать приводящим к удвоению громкости.

ДЕМПФИРОВАНИЕ — затрата энергии колебательной системы или частицы на преодоление трения или сил вязкости. При этом затраченная энергия переходит в тепло.

ДЕЦИБЕЛ (дБ) (одна десятая *бела*) — число, выражающее в логарифмической мере отношение двух величин; употребляется при большом диапазоне изменения этих величин. Бел можно определить как число десятикратных увеличений меньшей величины i_2 , требуемых для достижения значения большей величины i_1 , то есть $\lg i_1/i_2$. Число децибел получается путем умножения последней величины на 10. Чаще всего в дБ выражают *уровень звукового давления*; в этом случае меньшая величина обычно соответствует значению 2×10^{-5} Н/м², обозначаемому как нулевой уровень давления. Уровень звукового давления в дБ примерно равен

уровню интенсивности звука при нулевом уровне 10^{-12} Вт/м². Величина дБА — уровень звукового давления, измеренный в дБ при помощи *шумометра*, содержащего корректирующую цепочку, снижающую чувствительность устройства на низких и очень высоких частотах, для того чтобы точнее имитировать чувствительность человеческого уха и получать отсчеты, дающие некоторые указания на громкость, неприятное действие или приемлемость звука. Значение дБА обычно на 10 единиц превосходит эквивалентное значение *нормировочного индекса шума* для данного звука.

ДИФРАКЦИЯ — отклонение от законов зеркального отражения или *преломления* и вообще от геометрических законов распространения воли. Типичный пример — проникновение звука в область *звуковой тени* позади акустического экрана.

ДИФФУЗНОЕ ПОЛЕ — звуковое *поле*, в каждой точке которого уровень звукового давления один и тот же, а звуковые волны распространяются одинаково во всех направлениях.

ДЛИНА ВОЛНЫ (λ) — расстояние между «гребнями» синусоидальной волны или, точнее, расстояние (по перпендикуляру) между двумя фронтами, различающимися по фазе на один целый период. Длина волны равна отношению скорости звука к частоте. Случайный и непериодический звук также можно описывать при помощи понятия *частоты*, а следовательно, и длины волны.

ДОПЛЕРОВСКИЙ ЭФФЕКТ, ДОПЛЕРОВСКИЙ СДВИГ — изменение частоты звука, наблюдаемое в точке, движущейся относительно источника звука и (или) относительно среды, в которой распространяется звук. Когда автомашина дает гудок, подъезжая к неподвижному наблюдателю, то в интервале между двумя последовательными колебаниями диафрагмы гудка источник звука движется туда же, куда и волна, и поэтому следующая волна создается ближе к предыдущей, чем в случае неподвижной автомашины. Получается волна *меньшей длины*, а значит повышается *частота*.

ЗАГЛУШЕННАЯ КАМЕРА — помещение со стенками, почти полностью поглощающими звук в весь

ма широком диапазоне частот. Заглушенная камера почти создает условия *свободного поля*.

ЗВУК — волновое движение в какой-либо упругой *среде* либо слуховое восприятие, создаваемое таким движением.

ЗВУКОВАЯ ТЕНЬ — акустический аналог световой тени; акустическая тень частично «засвечивается» вследствие *дифракции*.

ЗВУКОВАЯ ЧАСТОТА — частота, лежащая в слышимом диапазоне частот, примерно 20—20 000 Гц.

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ — мера изоляции звука перегородкой, стеной или панелью, выраженная в дБ. Звукоизоляция равна десятикратному десятичному логарифму отношения интенсивностей падающей и прошедшей волн либо просто разности (в дБ) уровней интенсивностей падающей и прошедшей волн. Если, впрочем, речь идет о замкнутом помещении в целом, реверберация внутри него уменьшает суммарную звукоизоляцию.

ИМПЕДАНС — комплексное отношение силы (или давления) к скорости; см. также **ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ**.

ИНТЕНСИВНОСТЬ — поток энергии через единичную площадку, передаваемый звуковой волной; имеет размерность Вт/м², может быть выражена в децибелах относительно некоторого уровня. Для *плоской свободной бегущей волны* интенсивность равна $p^2/\rho c$, где p — звуковое давление, ρc — *волновое сопротивление* среды.

ИНФРАЗВУКОВОЙ — имеющий *частоту*, меньшую *звуковых частот*.

КОСТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ — способ, которым звук может проникнуть во внутреннее ухо и быть услышанным, не проходя через воздух в слуховом проходе.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ (α) — если поверхность находится в звуковом поле, то « α » есть отношение звуковой энергии, поглощенной поверхностью, к энергии, падающей на нее. Если поглощается 60% падающей энергии, то коэффициент поглощения равен 0,6.

КОЭФФИЦИЕНТ СНИЖЕНИЯ ШУМА — усредненное значение *коэффициента поглощения* данной по-

верхности или данного материала на частотах 250, 500, 1000 и 2000 Гц; используется как упрощенный показатель эффективности акустических плиток.

КРИТЕРИЙ РИСКА ПОВРЕЖДЕНИЯ СЛУХА — уровень шума, задаваемый в зависимости от частоты и таких факторов, как форма волны (например, чистый тон, *случайный* шум) и прерывистость, при котором вероятность стойкого понижения слуха превосходит определенную величину.

КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА — самая низкая частота, при которой еще возможен резонанс совпадений для данной панели и выше которой звукоизоляция панели понижается. Чем меньше упругость панели и чем она тоньше, тем выше критическая частота. В Приложении 1 даны некоторые типичные значения критической частоты.

МАСКИРОВКА — повышение *порога слышимости* данного звука вследствие воздействия другого звука; наиболее ярко выражена в случае, когда маскируемый звук выше маскирующего.

НЕПРЕРЫВНЫЙ СПЕКТР — частотный состав звука, характеризующийся непрерывным распределением частотных компонент во всем диапазоне.

НОЙ — единица шумности, связанная с воспринимаемым уровнем, выраженным в *РН* дБ.

НОРМИРОВОЧНЫЕ КРИВЫЕ И НОРМИРОВОЧНЫЕ ИНДЕКСЫ ШУМА — наборы кривых, связывающих уровни звука в октавных полосах с приемлемостью для тех или иных условий — от заводского шума до квартирного. Результаты октавного анализа шума наносят на график нормировочных кривых шума, и наибольший номер кривой, превышенный уровнем шума в одной или нескольких октавных полосах, считается нормировочным индексом шума. Существует также арифметический метод нахождения этого индекса. В широкой практике предпочитают пользоваться оценкой шума в дБА как более адекватной.

ОКРУЖАЮЩИЙ ШУМ — фоновый шум или общий доминирующий шум на данном участке (иногда в отсутствие шума, подлежащего исследованию).

ОКТАВА — интервал между двумя звуками, частоты которых различаются вдвое.

- ОСНОВНАЯ ЧАСТОТА** — частота повторения для периодической функции, определяется (нестрого), как низшая частота сложной периодической волны, иногда называется первой гармоникой (см. также СУБГАРМОНИКИ).
- ПЕРИОДИЧЕСКИЙ** — постоянно повторяющийся без изменений через равные промежутки времени, называемые периодом. Классический пример — синусоидальная волна.
- ПИКОВЫЙ УРОВЕНЬ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ** — значение (в дБ) наибольшего звукового давления (в отличие от среднеквадратичного, или *эффективного*, звукового давления).
- ПЛОСКАЯ ВОЛНА** — волна, в которой *волновые фронты* — плоскости, параллельные друг другу.
- ПОЛЕ** — область, где происходят интересующие нас акустические явления.
- ПОЛОСА** — участок частотного спектра, например одна октава, половина октавы, треть октавы.
- ПОРОГ СЛЫШИМОСТИ** — минимальный уровень звукового давления, воспринимаемый слухом испытуемого на данной частоте.
- ПРЕСБИКУЗИС ИЛИ ПРЕСБИАКУЗИС** — тугоухость (обычно для высоких звуков), развивающаяся с возрастом.
- ПОТЕРЯ СЛУХА** — повышение порога слышимости в данном ухе на данной частоте (выраженное в дБ) относительно нормального порога.
- ПУЧНОСТЬ** — точка, линия или поверхность, на которой амплитуда колебаний достигает максимума (см. также УЗЕЛ).
- РЕВЕРБЕРАЦИЯ** — звук, образующийся в помещении в результате многократных отражений от ограждающих поверхностей. Реверберационный звук продолжает некоторое время звучать еще и после прекращения излучения звука источником (см. ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ).
- РЕЗОНАНС** — система находится в резонансе при вынужденных колебаниях на данной частоте, если амплитуда ее колебаний уменьшается как при увеличении, так и при уменьшении частоты вынуждающей силы.

РЕЗОНАНС (ИЛИ ЭФФЕКТ) СОВПАДЕНИЙ — совпадение длины изгибной волны, распространяющейся по панели, с длиной волны следа падающей звуковой волны на панели. Частоту, ниже которой резонанс совпадений невозможен, называют *критической частотой*.

РЕЗОНАНСНАЯ ЧАСТОТА — частота, на которой имеет место *резонанс*.

РЕФРАКЦИЯ, ИЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЕ — изменение направления распространения звука при переходе из одной среды в другую или при прохождении области *градиента* скорости звука.

СВОБОДНАЯ БЕГУЩАЯ ВОЛНА — волна, распространяющаяся в безграничной среде (теоретическое представление).

СВОБОДНОЕ ПОЛЕ — область, в которой отсутствуют существенные отражения звука.

СВЯЗАННЫЕ МОДЫ — моды, оказывающие взаимное влияние друг на друга.

СДВИГ ПОРОГА — изменение (временное или постоянное) *порога слышимости* у данного субъекта.

СИНУСОИДАЛЬНАЯ ВОЛНА — волна, изменяющаяся во времени и в пространстве по закону синуса. Это самый простой вид волны, и его часто называют чистым тоном. Проекция точки, равномерно движущейся по окружности, на прямую, лежащую в плоскости окружности, перемещается по закону синуса угла, описываемого радиус-вектором точки.

СИНУСОИДАЛЬНЫЙ — изменяющийся пропорционально синусу угла.

СКОРОСТЬ ЧАСТИЦ — для того чтобы передавать звук в среде, волна, проходящая через какую-либо точку, должна приводить в колебание частицу, находящуюся в этой точке. Существенными могут явиться значения скорости в данный момент, максимальные значения, среднеквадратичные, или эффективные, значения; при данном эффективном звуковом давлении эффективная скорость частиц изменяется обратно пропорционально волновому сопротивлению.

СЛУЧАЙНЫЙ ШУМ — шум сплошного спектра, вызванный случайными колебаниями давления или

аналогичные флуктуации любой другой величины.

СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА — частота, на которой система свободно колеблется после прекращения соответствующего возбуждения.

СОН — единица громкости, рассчитанная на получение приблизительно равномерной шкалы громкости.

СПЕКТР — совокупность частот, образующих данный звук.

СРЕДА — вещество, по которому передается звуковая волна.

СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ — эффективное значение колеблющейся величины: результат возведения в квадрат, усреднения и последующего извлечения квадратного корня. Максимальное звуковое давление в синусоидальной волне в $\sqrt{2}$ раз больше среднеквадратичного значения. Эффективный уровень звукового давления дает наилучшую меру обычных звуков, но для оценки шумов импульсного характера требуется указать *пиковый уровень*.

СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА — среднее расстояние, пробегаемое звуком между двумя последовательными отражениями в помещении.

СУБГАРМОНИКА — *колебание с частотой*, равной основной частоте периодической волны, разделенной на целое число.

СУПЕРПОЗИЦИЯ — арифметическая комбинация полей двух или более волн.

ТОН — звук определенной *высоты*.

УГЛОВАЯ ЧАСТОТА (ω) — из математических соображений удобно пользоваться частотой, выраженной в *герцах*, умноженной на 2π , что эквивалентно углу в 360° , выраженному в радианах. Угловая частота $\omega = 2\pi f$, таким образом, есть частота, выраженная в радиан/с.

УЗЕЛ — точка, линия или поверхность, на которых *амплитуда* волны равна нулю.

УРОВЕНЬ — значение данной величины в децибелах.

УРОВЕНЬ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ — *эффективное* звуковое давление, или *среднеквадратичное значение* отклонений давления от атмосферного давления, вызванных прохождением звуковой вол-

ны, выраженное в *децибелах* относительно давления 2×10^{-5} Н/м².

УРОВЕНЬ ЗВУКОВОЙ МОЩНОСТИ — полная звуковая энергия, излучаемая источником за 1 с, выраженная в *децибелах*, обычно относительно уровня 10^{-12} Вт.

ФАЗА — мера «попадания в такт» или «выхода из такта» для звука или другой периодической функции. Измеряется в угловой мере в градусах или, лучше, в радианах ($360^\circ = 2\pi$ радиан); если, например, одна синусоидальная волна отстает от другой, так что минимумы первой совпадают по времени с максимумами второй, то говорят о расхождении по фазе на π радиан, или на 180° (см. также **УГЛОВАЯ ЧАСТОТА**).

ФОН — единица уровня громкости (см. **СОН**).

ЦИКЛЫ В СЕКУНДУ — см. **ЧАСТОТА**.

ЧАСТИЦА — в теоретическом смысле бесконечно малый объем вещества или среды; практически — достаточно малый объем.

ЧАСТОТА — число повторяющихся циклов движения, которое колебательная система или частица совершает в течение 1 с; выражается в герцах (Гц) или в цикл/с. Непериодические волны также можно характеризовать понятием частоты, но в этом случае частотой считается число повторений процессов нарастания и убывания амплитуды данной величины.

ШУМ — звук, нежелательный для слушателя, бессмысленный, *случайный* звук.

ШУМОВЫЕ КРИТЕРИИ — наборы кривых, связывающих уровни звука в октавных полосах с помехой разборчивости речи и приемлемостью для тех или иных условий (обычно для разных типов конторских помещений).

ЭФФЕКТ ВЕЧЕРИНКИ — способность «настроиться» на один голос среди шума других голосов.

ЭФФЕКТИВНЫЙ — термин «эффективный», как например, выражение «эффективное звуковое давление», означает *среднеквадратичное значение*.

ЭХО — отраженный звук, достигающий слушателя с таким большим запозданием, что вызывает ощущение, отдельное от ощущения прямого звука.

Приложение 1

Поверхностная плотность и критическая частота для различных материалов

Материал	Объемная плотность, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^{-3}$	Модуль Юнга, $\text{Н/м}^2 \cdot 10^{-9}$	Критическая частота, умноженная на поверхностную плотность, $\text{Гц} \cdot \text{кг/м}^2$
Свинец	11	14	600 000
Сталь	8	210	98 000
Алюминий	2,7	70	32 000
Стекло	2,5	41	38 000
Бетон	2,3	24	44 000
Кирпичная кладка	2	16	42 000
Твердый картон	0,8	2,1	30 500
Штукатурная плита	0,75	1,9	29 000
Фанера	0,6	4,3	13 200
Флакслинум	0,4	1,2	13 200

Типичные значения звукоизоляции перегородок

	Толщина, мм	Поверхностная плотность, кг/м ²	Звукоизоляция, дБ						
			Средняя	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1 кГц	2 кГц	4 кГц
Фанера	6	3	18	10	13	17	22	24	21
Стекло	5	13	23	17	21	25	26	23	26
Сталь	0,12	9,3	29	20	23	27	32	34	41
Кирпич (оштукатуренный)	145	220	45	34	36	41	51	58	60
Бетон	152	350	47	35	39	45	52	60	67
Двойная перегородка из гип- совой сухой штукатурки с металлическими связями	100	43	43	25	37	44	52	55	45
То же, но с деревянными связями	100	40	40	25	31	40	46	53	48
Фанера, приклеенная по обе стороны деревянных стоек с сечением 25X76 мм	90	12	26	16	18	26	28	37	33
Патентованные модульные акустические панели	76	42	41	24	30	37	41	46	45

Таблица децибел

Отношение интенсивностей	дБ	Отношение интенсивностей	дБ
100	+20	0,80	-1
79	+19	0,63	-2
63	+18	0,50	-3
50	+17	0,40	-4
40	+16	0,32	-5
32	+15	0,25	-6
25	+14	0,20	-7
20	+13	0,16	-8
16	+12	0,13	-9
13	+11	0,10	-10
10	+10	0,079	-11
7,9	+9	0,063	-12
6,3	+8	0,050	-13
5,0	+7	0,040	-14
4,0	+6	0,032	-15
3,2	+5	0,025	-16
2,5	+4	0,020	-17
2,0	+3	0,016	-18
1,6	+2	0,013	-19
1,3	+1	0,010	-20
1,0	0		

Пример: сложение шумов с уровнями 86, 83 и 79 дБ, ответ: $1,0 + 0,5 + 0,2 = 1,7$, что соответствует примерно 2 дБ, так что суммарный уровень составляет 88 дБ.

Типичные значения коэффициента поглощения

Коэффициент поглощения, α

Вещество	Коэффициент поглощения, α						
	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1 кГц	2 кГц	4 кГц	
Воздух (на 1000 м ³) при комнатной температуре				0,03	0,06	0,2	
Кирпичная кладка	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05	
Бетон	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05	0,05	
Оконные стекла	0,2		0,1		0,05		
Фанера или твердый картон, установленные с воздушным промежутком	0,3		0,15		0,1		
Деревянные полы	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	
Тонкий ковер на бетонном полу	0,1	0,15	0,25	0,3	0,3	0,3	
Ковер с ворсом на толстом слое войлока	0,1	0,25	0,5	0,5	0,6	0,35	
76-миллиметровый слой минеральной шерсти (на жестком основании), облицованный перфорированным металлическим листом	0,4	0,7	0,75	0,9	0,85	0,75	
То же для толщины 25 мм (как в акустических плитках)	0,1	0,3	0,6	0,75	0,8	0,8	
15-миллиметровые минеральные плиты с щелевой перфорацией (на твердом основании)	0,1	0,25	0,83	0,87	0,64	0,52	
12-миллиметровые перфорированные древесноволокнистые плиты	0,2	0,55	0,6	0,6	0,65	0,8	

Затухание звука в воздуховодах с акустической облицовкой

Толщина облицовки (минеральная шерсть) на обеих сторонах, мм	Ширина воздушного промежутка, мм	Ослабление на погонные 300 мм, дБ							
		125 Гц	250 Гц	500 Гц	1 кГц	2 кГц	4 кГц		
25	25	1	2	5	15	37	58		
	50	0,5	1	3	10	27	26		
	100	—	0,5	2	7	17	10		
	200	—	0,5	1	5	7	3		
50	400	—	—	1	5	2	—		
	25	2	5	11	24	32	48		
	50	1	3	9	19	22	28		
	100	0,5	2	6	11	12	10		
200	200	0,5	1,5	3	7	6	2		
	400	—	1	2	4	1	—		

Рекомендуемая литература

- Андреева-Галанина Е. Ц., Алексеев С. В., Кадыскин А. В., Суворов Г. А.*, Шум и шумовая болезнь, Л., изд-во «Медвцина», 1972.
- Брэгг У. Г.*, Мир света. Мир звука, М., изд-во «Наука», 1967.
- Ватсон Ф. Р.*, Архитектурная акустика, М., ИЛ, 1948.
- Красильников В. А.*, Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах, 3-е изд., Физматгиз, 1960.
- Тимофеев А. К.*, Звукоизоляция в жилищном строительстве, М., изд-во «Знание», 1956.
- Тиндаль Д.*, Звук, М., Госиздат, 1922.
- Флеминг Дж.*, Волны в воде, воздухе и эфире, М.—Л., изд-во АН СССР, 1937,

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА	5
ВВЕДЕНИЕ	9
1. НЕВЕДОМАЯ НАУКА — АКУСТИКА	11
2. ВОЗДУХ, ВОЛНЫ, ЗВУК	20
3. ШИПЕНИЕ, СВИСТ, ГУДЕНИЕ, ГРОХОТ	37
4. ШУМ В ДЕЦИБЕЛАХ	55
5. СЛУХ И ПОВРЕЖДЕНИЯ СЛУХА	71
6. ОТЧЕГО ТАК ШУМНО? МЕХАНИЗМЫ И ШУМ	100
7. ОТ ТОЧКИ А К ТОЧКЕ В — ЗВУК В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ	126
8. ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА И ДЫРКИ В ПОТОЛКЕ	142
9. ЗВУКОНЕПРОНИЦАЕМОСТЬ — РАЗОВЛАЧЕННЫЙ МИФ	161
10. ПОМЕЩЕНИЯ, СТРОЕНИЯ И КОНЦЕРТНЫЕ ЗАЛЫ — «ЛЕТАЮЩИЕ БЛЮДЦА» ПОД КРЫШЕЙ	179
11. НАСКОЛЬКО ТИХО ДОЛЖНО БЫТЬ? КОМФОРТ, ОБЯЗАННОСТИ РАБОТОДАТЕЛЯ И ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО	197
12. КАКОГО ЗАГЛУШЕНИЯ МОЖНО ДОБИТЬСЯ? КАК КОНСТРУИРОВАТЬ МАЛОШУМЯЩИЕ МЕХАНИЗМЫ?	219
13. ОБЕСШУМЛИВАНИЕ И ИЗОЛЯЦИЯ ЗВУКА	240
14. АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И РЕЦЕПТУРА	269
15. МНОГОШУМНОЕ БУДУЩЕЕ	280
АКУСТИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ	292
ПРИЛОЖЕНИЯ	302
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	307

ИБ № 945

**Р. Тэйлор
ШУМ**

**Редактор А. Коидрашова
Художник Ф. Инфанте
Художественный редактор Л. Наумов
Технический редактор Л. Чуркина
Корректор В. Постнова**

**Сдано в набор 10/VI 1977 г. Подписано к печати 21/XI 1977 г. Бумага
тип. № 1 84×108¹/₃₂—4,88 бум. л. 16,38 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 15,62.
Изд. № 12/9298. Цена 85 коп. Зак. № 661.**

**Издательство «Мир»
Москва, 1-й Рижский пер., 2**

**Ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли,
198052, Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.**