

И.Р. БАГДАСАРЯН

**ВОСТРЕБОВАННАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ АКУСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
В ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ**

Рассматриваются вопросы обеспечения акустического "комфорта" при проектировании современных зданий и сооружений. В работе учитываются условия распространения "структурной" звукопередачи по смежным конструкциям. Предложены каменные материалы, отличающиеся по упругости и плотности от жестких материалов конструкций, чтобы осуществить разрыв в конструкциях, с помощью которого можно устранить "структурный" звук в зданиях. Для достижения данной цели в статье предлагается увеличить толщину пористого материала или предусмотреть воздушный промежуток между поглотителем и отражающей конструкцией. Акцентируется также внимание на таких физических явлениях, как звук, упругие (звуковые) колебания и, конечно же, волны в разных средах, их возбуждение и восприятие, распространение, взаимодействие со средой и разнообразное применение.

Ключевые слова: акустика зданий, строительные материалы, базальтовая вата, каменная вата, звукоизоляция, "структурный" звук, звуковые колебания, звуковые волны.

Строительное материаловедение достигло определенных успехов в создании композиционных материалов. Такие композиты обеспечивают безопасность зданий и сооружений, их защиту от определенных природных, техногенных воздействий. Поэтому одной из главных проблем при строительстве здания и сооружения является обеспечение акустического "комфорта", снижение шума в зданиях. Таким образом, возникает необходимость высокой звукоизоляции ограждающих конструкций при проектировании. При решении данного вопроса учитываются не только их конструктивные параметры, но и условия распространения структурной звукопередачи по смежным конструкциям.

На основе результатов экспериментальных исследований С. Лифшица, Дж. Констебля, Е. Мейера, П. Паркина, Г. Оберста и др. представлены два вида прохождения звука: "*воздушный*" и "*структурный*", т.е. *по конструкциям* – это двойные перегородки или звукоизоляционный материал между слоями многослойных конструкций, или изоляция помещений по методу "комната в комнате". Согласно предложенным вариантам, положительного результата в повышении звукоизоляции не произошло. Положительной динамикой поднятия акустики оказался метод, предложенный профессором физиком-акустиком

Верн Оливер Кнудсеном: для предотвращения "структурного" звука необходимо произвести *разрыв в конструкциях*. Разрывы должны быть заполнены такими материалами, которые отличаются по упругости и плотности от жестких материалов конструкций (минеральные каменные ваты, которые возникают из огненно-жидкого расплава изверженных габбро-базальтовых горных пород, в результате чего получаются тепло- и звукоизоляционные материалы в виде каменной ваты) [1,2]. В строительстве массивные конструкции имеют более высокую звукоизоляцию, чем облегченные конструкции зданий и сооружений. Объединение несущего каркаса здания с легкими ограждающими панелями значительно увеличило уровень звука в помещениях по причине распространения "структурного" звука по смежным конструкциям.

Акустические материалы бывают *звукоизолирующие* (отражают звук и не позволяют ему пройти сквозь стены - гипсокартон, бетон, кирпич др.) и *звукопоглощающие* (материалы на основе минеральной (каменной) ваты, стекловолокно, пенополиуретан и др., которые максимально приглушают шумы и не дают им отразиться обратно (см. табл.)). Конечно же, комбинирование двух типов решений представляет собой надежный метод, но каменная вата обладает рядом преимуществ (рис.2 и 3):

- отличная звукоизоляция: уровень шума снижается на 43...62 Db;
- низкая теплопроводность;
- высокая устойчивость воздействию высоких (до $t=1000^{\circ}\text{C}$) температур: каменная вата не плавится, не дымит, не горит;
- материалы на основе каменной ваты не деформируются, сохраняют качества в течение эксплуатации, т.е. долговечны;
- экологически чистый (состоит из природных материалов, безвреден для человека) материал;
- высокая биостойкость: каменная вата отлично справляется с такими биологическими факторами, как плесень или гниение.

Каменная вата - материал недорогой с низкой степенью теплопроводности (ею утепляют кровли, перекрытия, стены и т.д.). В современном строительстве каменная вата считается одним из наиболее эффективных утеплителей конструкций [3,4]. Из нее (горизонтально-слоистой, вертикально-слоистой, пространственной или гофрированной структуры), кроме плит и матов, изготавливают также формованные изделия (цилиндры, сегменты). Изделия из каменной ваты обладают тепло- и звукоизоляционными свойствами благодаря открытой *пористости*. *Коэффициент теплопроводности* каменной ваты находится в пределах 0,035...0,039 Вт/мК. Сама вата не горючая, но при $t=600 \dots 700^{\circ}\text{C}$ может распадаться, образуя горячую пыль [1, 2, 5, 6]. Воздух в

порах ваты обладает низкой теплопроводностью, находится в статичном состоянии. Именно этот фактор определяет её отличные теплоизоляционные качества [5, 7]. Из-за наличия открытых пор каменная вата *паропроницаема* ($0,25...0,35 \text{ мг/м}^2\text{чПа}$). Плотность ее колеблется от 30 кг/м^3 до 220 кг/м^3 , поэтому жёсткие плиты выдерживают распределённую нагрузку до 70 кПа . Изделия из ваты могут выпускаться с покрытием из алюминиевой фольги, крафт-бумаги, стеклохолста и т.д.



Рис.1. Базальтовая вата в плитах

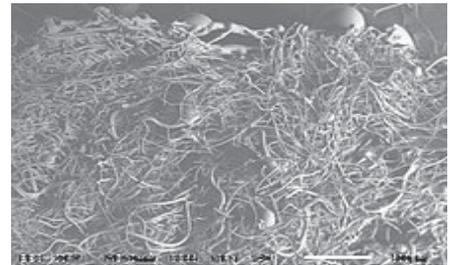


Рис.2. Каменная вата

В современном строительстве для звукоизоляции в зданиях и сооружениях базальтовую вату (рис.1) применяют в следующих конструкциях: в стенах (в вентилируемых фасадных системах, в фасадах с тонким или толстым штукатурным слоем, в лёгких внешних каркасных конструкциях, трёхслойных кирпичных стенах, стеновых железобетонных панелях, в металлических сэндвич - панелях, панелях поэлементной сборки); в перегородках; для утепления полов по лагам (рис.2) или плитам перекрытия с возможностью устройства стяжек; в скатных и в плоских кровлях (укладка утеплителя по железобетонным плитам или профилированному настилу с дальнейшей гидроизоляцией битумными материалами или ПВХ-мембранами); в стальных несущих колоннах и балках, воздуховодах, железобетонных перекрытиях, в трубных и кабельных проходах. Благодаря негорючести и высокой температуре плавления волокон каменная вата может применяться для изоляции поверхности при $t = 700 \text{ }^\circ\text{C}$. Деревянные полы не такие шумные, как каменные, тем не менее необходимы воздушные зазоры, т.е. акустические резонаторы, которые обеспечивают вентиляцию деревянному полу и предотвратят гниение и сушку материала (рис.3). В волокнистых строительных материалах рассеивание энергии колебания воздуха происходит на нескольких физических уровнях (рис.4):

1) вследствие вязкости воздуха (его очень много в межволоконном пространстве) колебание частиц воздуха внутри поглотителя приводит к трению;

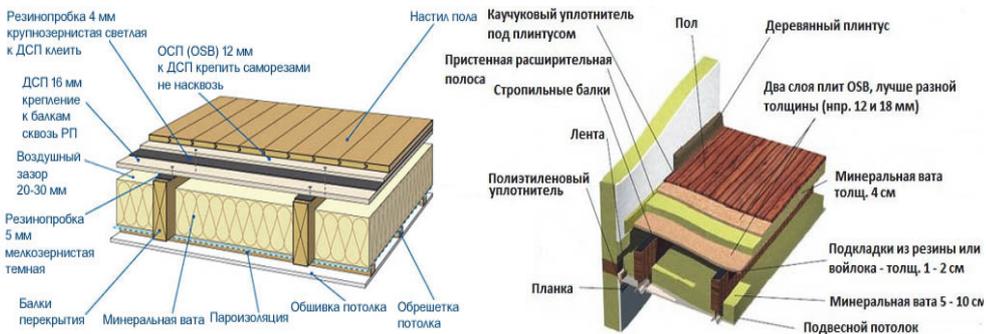


Рис. 3. Вентиляция на деревянном перекрытии

2) происходит трение воздуха о волокна, поверхность которых тоже велика;

3) волокна трутся друг о друга, из-за трения кристаллов самих волокон происходит рассеивание энергии. Поэтому на средних и низких частотах волнокнистые материалы имеют высокий коэффициент звукопоглощения.

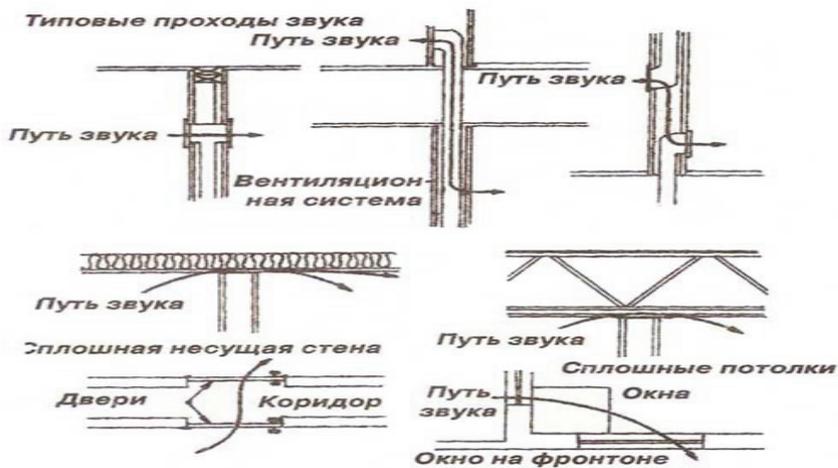


Рис. 4. Участки проникновения звука и шума

Сама акустика (от греч. - слуховой) является наукой о звуке, т.е. это область физики (механики) и техники, изучающая упругие (звуковые) колебания и волны в разных средах, их возбуждение и восприятие, распространение, взаимодействие со средой, а также разнообразное применение [8, 9]. Звуковые колебания рассматриваются от самых низких (условно от $\Gamma\zeta$) до высоких частот.

В работах некоторых учёных звук в 1100 Db (децибел, (1)) полностью уничтожит вселенную в "черной дыре". Нормой, воспринимаемой человеческим ухом при ощущении боли, является интенсивность в 120...130 Db (рис.5):

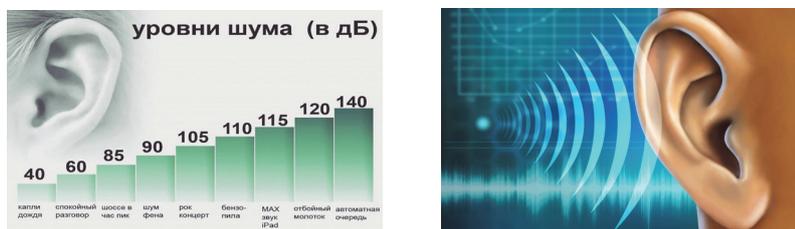


Рис. 5. Уровни шума

$$1Db = 20 \lg \frac{p}{20 \text{ мкПа}}, \quad (1)$$

где p - измерительное звуковое давление; 20 МПа - минимальное звуковое давление, при котором человек слышит звук.

Смерть человека наступает при 200 Db [10].

Механические колебания звука движутся вперед с помощью волнового движения (отдельные частицы материала - молекулы воздуха, возвращаются в исходное положение, а звуковая энергия движется вперед). Движение волны распространяется одинаково во всех направлениях, если на него не влияет объект или другой материал на своем пути. Звуковые волны могут распространяться через твердые тела, жидкости и газы, но не через вакуум. Звуковые волны подобны любому другому волновому движению и определяются с точки зрения длины волны, частоты, скорости:

$$V = v\lambda, \quad (2)$$

где V - скорость волны, т.е. расстояние, перемещаемое за секунду в фиксированном направлении, м/с ; v - частота волны, т.е. количество циклов вибрации в секунду, Гц ; λ - длина волны (расстояние в пространстве между двумя соседними волнами), м ;

$$\lambda = c / T = c \cdot f, \quad (3)$$

для человека $\lambda = 0,0017 \dots 17$.

При каждой вибрации источника звука волна перемещается вперед на одну длину волны. Следовательно, количество вибраций в секунду указывает на общую длину, пройденную за 1 с - то же самое, что и скорость. Это соотношение справедливо для всех волновых движений (1).

Звуковая волна распространяется от источника со скоростью 344 м/с при измерении в сухом воздухе при $t=20^\circ\text{C}$. Это приличная скорость в помещении, но достаточно медленная над землей, чтобы мы могли заметить задержку между тем, как видим источник звука, например удаленный фейерверк, и последующим

слухом о взрыве. Скорость звука не зависит от скорости возникновения звуковых колебаний, следовательно, частота звука не влияет на его скорость. На скорость звука влияют изменения атмосферного давления, например, вызванные погодой, а также свойства материала, через который он распространяется (см. табл.). Скорость распространения звука зависит от плотности среды и изменяется в широких пределах [5,11,12]. Встречая на своем пути препятствие, звуковая волна может отражаться и преломляться (рис. 6). Время запаздывания прихода отраженной волны относительно волны, идущей прямо, является реверберацией. При прохождении через отверстие (окно, дверь и т.п.) наблюдается явление дифракции звуковой волны (рис. 7).

Акустический расчет на основе имеющихся данных позволяет заранее узнать, как будет "звучать" помещение, расчет производится с помощью специализированных программ: Yamaha CISSCO, Nexo NS-1.



Рис. 6. Пути прямой и отраженных звуковых волн



Рис. 7. Дифракция звуковой волны

Без предварительного анализа акустических характеристик помещения даже дорогостоящее профессиональное оборудование не оправдывает тех ожиданий, которые на него возлагают, поскольку интеграция оборудования имеет не меньшее значение для конечного результата, чем качество техники [13].

Таблица

Скорость звука некоторых твердых стройматериалов

Строительные материалы	Продольная волна, м/с	Поперечная волна, м/с	Норм. волна (волна Лэмба), м/с
Бетон	3700	3200	-
Древесина	3960	-	-
Гранит	5950	-	-
Железо	5950	3240	5120
Кирпич	4200	-	3600
Стекло (кварцевый песок)	5100	2840	3720
Резина	1830	-	-
Сталь	5940	3220	5180
Чугун	4994	2809	4480

В отличие от *газов* в воздухе, *звук* распространяется быстрее в жидкостях и *твердых телах* из-за влияния плотности и эластичности этих материалов. Частицы таких материалов быстрее реагируют на вибрации и поэтому передают вибрации давления с большей скоростью. Например, сталь очень эластична, и звук распространяется через сталь примерно в 14 раз быстрее, чем через воздух. Если производящий звуковые волны объект вибрирует, например, 100 раз в секунду, то частота такой звуковой волны будет равна 100 Гц. Человеческое ухо воспринимает это как звук определенной высоты.

Высота звука - это частота звука, воспринимаемая человеческим слухом (рис.1). Низкие ноты вызываются низкочастотными звуковыми волнами, а высокие - высокочастотными волнами. Большинство звуков, слышимых в повседневной жизни, представляют собой смесь более чем одной частоты, хотя, когда можно распознать конкретную "ноту", преобладает самая низкая основная частота.

В природе звуковой волны вибрация волны имеет попеременные изменения амплитуды (фаз). Если волновая вибрация в одном направлении встретит равную и противоположную вибрацию, то они погасятся. Эффект фазы звуковых волн заключается в отсутствии звука, а также дает возможность шумоподавления (ANR). Каждый объект имеет собственную частоту, например, звук брошенного на пол металлического стержня можно отличить от звука брошенного деревянного бруска. Собственная частота объекта зависит от таких факторов, как форма, плотность и жесткость объекта, а резонанс возникает, когда собственная частота объекта совпадает с частотой любых вибраций, приложенных к объекту. Результатом резонанса являются очень сильные вибрации на этой частоте. Он возникает во многих механических системах, например, это может привести к дребезгу незакрепленных частей автомобиля на определенных скоростях, когда они резонируют с вибрациями двигателя [14]. Менее драматично, но имеет практическое применение в зданиях то, что резонанс влияет на передачу и поглощение звука внутри перегородок.

Заключение

Разрывы в конструкциях должны быть заполнены такими материалами, которые отличаются по упругости и плотности от жестких материалов конструкций (базальтовая вата). Это наиболее эффективный метод предотвращения "структурного" звука. Именно каменные ваты пригодны для такой роли, т.к. они обладают экологичностью, долговечностью, биологической стойкостью, акустотеплоизолирующей способностью.

Доказано, что на скорость звука влияют перемена атмосферного давления, например, изменения, вызванные изменением погоды, а также свойства материала, через который он распространяется.

Для усиления звукопоглощения на низких частотах необходимо увеличить толщину пористого материала или предусмотреть воздушный промежуток между поглотителем и отражающей конструкцией.

Выбор строительных материалов с соответствующими акустическими и энергоэффективными свойствами имеет важное значение в современном проектировании зданий и сооружений. Хорошо спроектированная и эффективно построенная конструкция не только улучшает жизнь ее обитателей, но и способствует устойчивому будущему.

Одни и те же акустические процессы в помещениях рассматриваются тремя теориями: волновой, статистической и геометрической. Все три метода имеют значительную взаимосвязь, дополняя друг друга, и, как показывает опыт, только одним методом не удаётся решить конкретную задачу: *геометрическая (лучевая) теория* акустических процессов в помещениях основана на законах геометрической оптики, т.е. движение звуковых волн рассматривают подобно движению световых лучей, и характер отражений зависит от формы отражающей поверхности; *волновая теория* основывается на источнике звука, где звуковые волны распространяются в различных направлениях. Спектр сложного звукового (музыкального) сигнала может содержать частоты, которые отсутствуют или которых мало в спектре собственных колебаний воздуха, находящегося в помещении, что и вызывает ответное (резонанс) колебание воздушной среды на частотах, совпадающих с частотами источника. *Статистическая теория* заключается в том, что источники неодинаково удалены от различных плоскостей, поэтому невозможно считать равной вероятностью падения звуковых волн на различные участки плоскостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьев В.А.** Строительные материалы.- М., 1967.-464 с.
2. **Воробьев В.А., Комар А.Г.** Строительные материалы.- М., 1971.- 496 с.
3. **Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А.** Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий.- М.: Стройиздат, 1980.- 399 с.
4. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций/ **С.Д. Ковригин, А.В. Захаров** и др.- 2 изд.- М., 1969.- 328 с.
5. **Рахимов Р.З., Шелихов Н.С., Смирнова Т.В.** Теплоизоляция из каменной ваты: Учебное пособие.- М., 2010.- 311 с.
6. Строительные материалы и изделия: Учебное пособие/ **В.С. Руднов, Е.В. Владимирова** и др. - Екатеринбург, 2018.- 208 с.
7. **Заборов В.И.** Теория теплоизоляции ограждающих конструкций.- М., 1969.-187 с.
8. **Прохоров А.М.** Строительная акустика. Большая Советская энциклопедия.- 3-е изд.- М., 1978.- 18960 с.

9. Прохоров А.М. Советская энциклопедия: Словарь.- М., 1989.- 1632 с.
10. <https://dzen.ru/a/xpbd7rutw0wv334>
11. Заборов В.И., Клячко Л.Н. Борьба с шумом методом звукоизоляции.- М., 1964.- 123 с.
12. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом в градостроительстве.- Киев, 1975.- 128с.
13. <https://inout.by/blog/reviews/8323-akusticheskiy-raschet>
14. <https://www.parkerjonesacoustics.com/insights/in-depth/physics-of-sound-and-acoustics>

Институт прикладной механики НАН РА. Материал поступил в редакцию 29.02.2024.

Ի.Ռ. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ

ԱԿՈՒՍՏԻԿ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐԻ ԿԱՐԵՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՆԱԽԱԳԾՎՈՂ ՇԵՆՔԵՐՈՒՄ ԵՎ ԿԱՌՈՒՅՑՆԵՐՈՒՄ

Դիտակվում են ակուստիկական «հարմարավետության» հարցերը ժամանակակից շենքեր և շինություններ նախագծելիս: Աշխատանքում հաշվի են առնվում հարակից կառույցներով ձայնի «կառուցվածքային» հաղորդման տարածման պայմանները: Առաջարկվում են քարե նյութեր, որոնք առաձգականությամբ և կոշտ կառուցվածքային խտությամբ տարբերվում են կոշտ կառուցվածքային նյութերից ժամանակակից արդյունավետ մեթոդով կառույցներում ճեղքված առաջացնելու համար, որով շենքերում կանխվում է «կառուցվածքային» ձայնը: Այս նպատակին հասնելու համար առաջարկվում է ավելացնել ծակոտկեն նյութի հաստությունը կամ ապահովել օդային բացը կլանիչի և ռեֆլեկտիվ կառուցվածքի միջև: Ուշադրություն է դարձվել նաև այնպիսի ֆիզիկական երևույթներին, ինչպիսիք են ձայնը, առաձգական (ձայնային) տատանումները, ալիքները տարբեր միջավայրերում, դրանց գրգռումը և ընկալումը, տարածումը, շրջակա միջավայրի հետ փոխազդեցությունը և տարբեր կիրառությունները:

Առանցքային բառեր. շենքերի ակուստիկա, շինարարական նյութեր, բազալտի բամբակ, քարե բամբակ, ձայնամեկուսացում, «կառուցվածքային» ձայն, ձայնային տատանումներ, ձայնային ալիքներ:

I.R. BAGHDASARYAN

**THE DEMANDED NEED FOR ACOUSTIC ENVIRONMENT IN
DESIGNED BUILDINGS AND STRUCTURES**

Issues on ensuring the acoustic "comfort" in the design of modern buildings and structures are considered. The work takes into account the conditions for the propagation of "structural" sound transmission over adjacent structures. Stone materials differing in elasticity and density from rigid structural materials are proposed in order to make a gap in the structures, with the help of which to eliminate "structural" sound in buildings. To achieve this goal, the article proposes to increase the thickness of the porous material or provide an air gap between the absorber and the reflective structure. Attention is also focused on such physical phenomena as sound, elastic (sound) vibrations, and, indeed waves in different media, their excitation and perception, propagation, interaction with the environment and a variety of applications.

Keywords: building acoustics, construction materials, basalt wool, stone wool, soundproofing, "structural" sound, sound vibrations, sound waves.