

из твердых материалов, даже весьма толстые. Известно, что узники, томившиеся в крепостных казематах, переговаривались друг с другом, постукивая по разделявшим их толстым каменным стенам.

Двухслойное покрытие пола превратило акустически однородную конструкцию в акустически неоднородную. Первая колеблется под воздействием звука как единое целое, а во второй отдельные ее слои или элементы могут совершать «самостоятельные» перемещения и колебания, отличающиеся друг от друга амплитудой и фазой. К чему же привело такое превращение?

При ударе по двухслойному покрытию оно сминается, поглощая часть энергии удара. При этом торможение ударяющего тела происходит медленнее, т. е. его ускорение меньше, чем при ударе по твердой поверхности. Соответственно меньше и сила удара, которая пропорциональна массе ударяющего тела и его ускорению. Действительно, после укладки покрытия пола изоляция ударного шума улучшилась в среднем на 17—19 дБ. Это значит, что звуковое давление под перекрытием уменьшилось в 7—9 раз. А вот изоляция воздушного шума ухудшилась в среднем на 1—2 дБ. Это видно при сравнении индексов I_n межквартирных стен и междуэтажных перекрытий из панелей одинаковой толщины (см. табл. 1 и 2) и подтверждено измерениями звукоизоляции до и после устройства пола. Пока только отметим данный факт, оставив объяснение его причин для следующего раздела.

В итоге ни в одном из домов рассматриваемые перекрытия не обеспечивают требуемой изоляции воздушного шума ($I_n \geq 50$ дБ). Изоляция ударного шума в большинстве домов соответствует требуемой ($I_y \leq 67$ дБ). Причины разброса изоляции воздушного шума в одинаковых перекрытиях, но в разных домах те же, что и в стенах. Это различное исполнение деталей и узлов, в которых возможны трещины, щели (элементов скрытой электропроводки, мест пропуска через перекрытие труб отопления и т. д.). Различия в изоляции ударного шума одинаковыми перекрытиями вызваны в основном разным качеством покрытия пола (разная толщина и упругость подосновы и т. п.).

Рассмотрев наиболее простые конструкции стен и

перекрытий, мы убедились в том, какое значительное влияние оказывают на их звукоизоляционные свойства на первый взгляд малозначащие элементы и детали. Перейдем теперь к другим конструкциям.

Результаты натурных измерений в домах массового строительства подтвердили выводы, полученные в домах-представителях. В то же время они выявили случаи снижения звукоизоляционных свойств межквартирных стен толщиной 18—20 см из тяжелого бетона и из легких бетонов, а также более толстых стен, вызванные наличием в их элементах и узлах сквозных щелей и трещин. Измерения показали, что перекрытия с различными видами отдельных полов имеют индекс изоляции воздушного шума I_n от 49 до 58 дБ, т. е. в среднем 53 дБ, а индекс приведенного уровня ударного шума $\bar{I}_y$ — от 68 до 59 дБ, т. е. в среднем 63 дБ. Таким образом, фактические звукоизоляционные свойства этих перекрытий в среднем на 2—4 дБ лучше требуемых. Случаи неудовлетворительной звукоизоляции в отдельных домах связаны с нарушениями при строительстве типовых решений полов в части звукоизоляционной прослойки или примыканий полов к стенам.

Перекрытия со слоистыми полами из паркета, уложенного по древесноволокнистым плитам и панелям толщиной 14 см, имеют в среднем индексы $I_n = 51$ дБ и $\bar{I}_y = 64$ дБ, что на 1—3 дБ «лучше» требуемых значений. Случаи неудовлетворительной звукоизоляции в отдельных домах вызваны уменьшением толщины прослойки из древесноволокнистых плит по сравнению с проектной.

Итак, проверка в массовом строительстве подтвердила правильность с точки зрения звукоизоляции основных конструктивных решений домов, строящихся по проектам третьего поколения. В то же время она выявила необоснованность некоторых изменений конструктивных решений, происшедших в процессе освоения этих проектов, показала, что отклонения от проекта и некачественное выполнение деталей и узлов конструкций (стыков, элементов, связанных с инженерным оборудованием дома, и др.) вызывают «болезни» в целом вполне здоровых конструкций и приводят к ухудшению звукоизоляционных свойств домов.

Причины неудовлетворительной звукоизоляции и способы ее улучшения

Чтобы разобраться в причинах ухудшения звукоизоляции в жилых домах и определить способы ее улучшения, вспомним главные закономерности, которые «управляют» звукоизоляционными свойствами конструкций.

Источник шума создает в помещении звуковое поле, которое воздействует на все ограждающие помещение конструкции, оказывая на их поверхность переменное давление. Под воздействием звука происходят колебания конструкций, которые, в свою очередь, становятся источниками звука, вызывая колебания воздуха в соседних помещениях, излучая в них звуковую энергию. Через конструктивные узлы здания звуковые колебания передаются в виде структурного шума смежным конструкциям, которые также излучают звук в ограждаемые ими помещения (рис. 5). Таким образом происходит косвенная передача звука по фланговым конструкциям — в обход ограждения, разделяющего два помещения.

Звукоизоляция соседних помещений зависит от передачи звука как прямым, так и косвенными путями, от способности конструкций уменьшать уровень шумов, распространяющихся этими путями.

Способность акустически однородной конструкции сопротивляться воздействию на нее переменному звуковому давлению в значительной мере определяется ее инерционностью, которая выражается массой единицы ее поверхности — поверхностной плотностью (q). Теория звукоизоляции начиналась с «закона массы», согласно которому удвоение частоты звука или поверхностной плотности конструкции приводит к увеличению звукоизоляции на 6 дБ. Простой и удобный закон!

Однако при колебаниях ограждений возникают не только инерционные силы, но и силы упругости, стремящиеся вернуть конструкцию в первоначальное положение. Для системы, в которой действуют эти два вида сил, характерны собственные колебания, которые происходят на определенных — собственных — частотах.

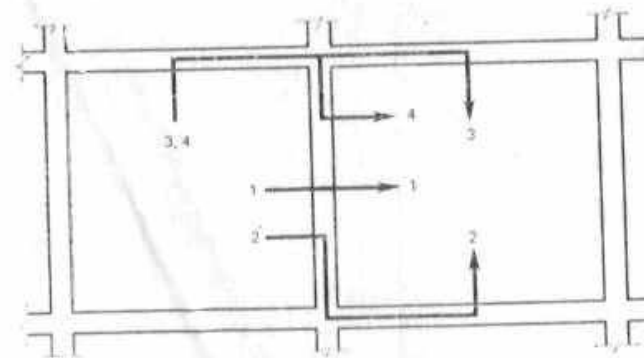


Рис. 5. Основные пути передачи звука между смежными помещениями: 1 — прямой; 2, 3, 4 — косвенные

Если на конструкцию воздействует внешняя переменная сила с частотой, равной одной из ее собственных частот, то возникает удивительное явление — резонанс. При резонансе инерционные и упругие силы в конструкции не сопротивляются колебаниям, а способствуют им. Амплитуда колебаний быстро возрастает почти без увеличения внешней силы. Предел этому возрастанию могут положить только силы внутреннего трения, которые также увеличиваются вместе с ростом амплитуды колебаний.

Резонанс — мощное воздействие. Взвод солдат, идущих в ногу, может раскачать и даже разрушить стальной мост, если ритм их шагов совпадет с частотой собственных колебаний моста, т. е. если возникнет резонанс.

Резонанс — та сила, которая деформирует, разрушает «закон массы».

Основной вид колебаний, посредством которых звуковая энергия передается через однородное ограждение, — это колебания изгиба, изгибные волны. Поэтому упругие силы, возникающие в конструкции, зависят от ее изгибной жесткости (B), т. е. от произведения момента инерции поперечного сечения конструкции (I) на модуль упругости материала (E).

Собственные частоты конструкции, на которых возможен резонанс, определяются сочетанием двух основных параметров — ее поверхностной плотности и изгибной жесткости.

При воздействии звукового поля на ограждение, кроме простых резонансов, возникают также пространственно-частотные резонансы, т. е., кроме частоты колебаний, совпадает и распределение звукового давления на поверхности конструкции с распределением

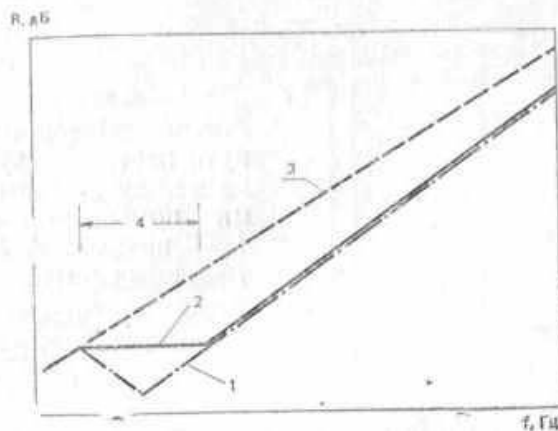


Рис. 6. Обобщенные частотные характеристики изоляции воздушного шума R акустически однородной конструкцией: 1 — фактическая при меньшем коэффициенте потерь звуковой энергии; 2 — то же, при большем коэффициенте; 3 — по «закону массы»; 4 — область наибольшего влияния пространственно-частотных резонансов

амплитуды колебаний в ее изгибной волне. В зоне действия таких резонансов звукоизоляция не увеличивается с ростом частоты звука (как должно быть по «закону массы»), а может даже уменьшиться, образуя «резонансный провал».

Глубина такого провала зависит от потерь звуковой энергии в ограждении (рис. 6). Внутреннее трение в материале, о котором сказано выше, — одна из причин потерь звуковой энергии в конструкции. Другие ее причины — закрепление ограждающей конструкции по контуру и отток энергии в смежные конструкции. Потери звуковой энергии в материале ограждающей конструкции и в ней самой в целом характеризуются коэффициентами потерь (η и η_0). Первый учитывает только потери на внутреннее трение в материале, второй — все потери звуковой энергии в ограждающей конструкции.

Таким образом, изоляция воздушного шума акустически однородной конструкцией определяется тремя основными параметрами: **поверхностной плотностью, изгибной жесткостью и потерями звуковой энергии**. Для достаточно толстых однородных ограждающих конструкций, которые применяют в жилых домах, увеличение каждого из этих трех параметров приводит к улучшению звукоизоляции.

В жилищном строительстве акустически неоднородные ограждающие конструкции имеют в основном два элемента или слоя из твердых материалов, разделенных воздушным промежутком или звукоизоляционной прослойкой. Это двойные стены (или перегородки) и перекрытия с полом, включающим зву-

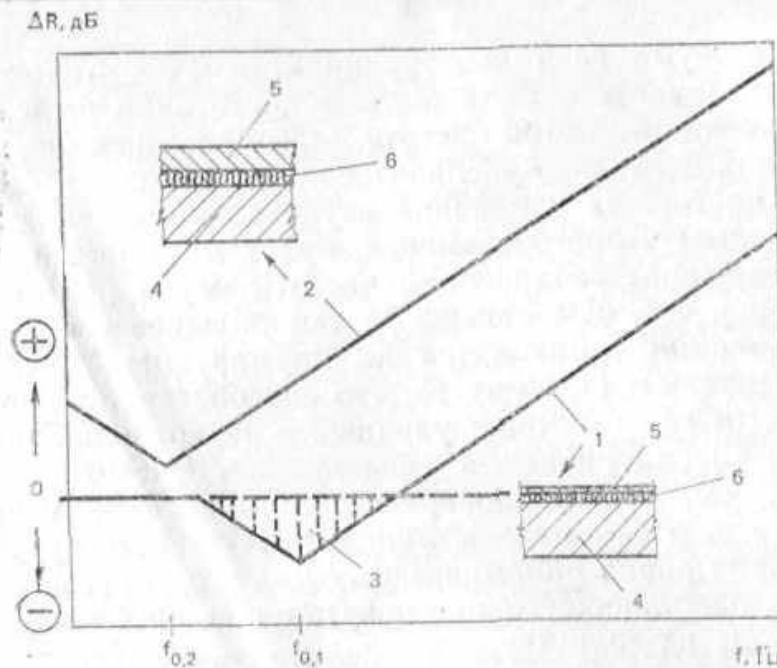


Рис. 7. Обобщенные частотные характеристики изменения изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией ΔR в результате наличия в ней второго элемента (при отсутствии косвенной передачи звука):

1 — при малой поверхностной плотности второго элемента, малых потерях звуковой энергии и большой жесткости прослойки; 2 — при большой поверхностной плотности второго элемента, больших потерях звуковой энергии и малой жесткости прослойки; 3 — область ухудшения звукоизоляции; 4 — основной элемент; 5 — дополнительный элемент; 6 — звукоизоляционная прослойка

конзоляционную прослойку. Основное отличие таких конструкций от однослойных заключается в том, что значительная доля звуковой энергии передается от одного твердого элемента или слоя другому посредством продольных колебаний в воздушном промежутке или звукоизоляционной прослойке. Другими словами, работает система, состоящая из двух масс, как бы соединенных пружиной. И тут снова на передний план выходят собственные частоты рассматриваемой системы и связанные с ними резонансы, причем важнейшая роль принадлежит низшей собственной частоте (f_0). То, как ведет себя конструкция на этой частоте, зависит от соотношения масс двух твердых элементов и потерь звуковой энергии в разделяющем их промежутке или прослойке. Если масса второго элемента мала и малы потери в прослойке, то на частоте f_0 изоляция воз-

душного шума всей конструкцией меньше, чем одним первым элементом. Если же она достаточно велика, то звукоизоляция на этой частоте может остаться без изменений или несколько увеличиться.

На частоте f_0 изменение звукоизоляции, вызванное добавлением второго элемента, будет минимальным, но с последующим увеличением частоты звука растет. Отсюда ясно, что, чем меньше f_0 , тем большее увеличение звукоизоляции приходится на нормируемый диапазон частот (рис. 7). Поэтому то, что способствует уменьшению частоты f_0 , вызывает улучшение звукоизоляционных свойств рассматриваемой конструкции. Частота f_0 тем меньше, чем больше поверхностная плотность второго элемента q_2 и чем меньше линейная жесткость прослойки, которая равна динамическому модулю упругости материала, заполняющего промежуток или прослойку, деленному на их толщину.

Таким образом, при заданных характеристиках первого элемента добавление второго дает тем большее увеличение звукоизоляции, чем больше его поверхностная плотность q_2 и толщина промежутка или прослойки между двумя элементами и чем меньше динамический модуль упругости и больше коэффициент потерь звуковой энергии материалом, заполняющим этот промежуток.

Изоляция воздушного шума акустически неоднородной конструкцией быстро растет с частотой звука и достигает таких высоких значений, что количество проникающей через нее звуковой энергии становится сопоставимым с количеством энергии, проникающей в то же помещение косвенными путями. С ростом частоты звука наступает момент, когда основная доля звуковой энергии проходит в изолируемое помещение по фланговым конструкциям. Он наступает тем скорее, чем больше интенсивность косвенной передачи звука, т. е. чем меньше изоляция воздушного шума фланговыми конструкциями и больше их площадь, излучающая звук в изолируемое помещение, по сравнению с соответствующими характеристиками основного (первого) элемента ограждающей конструкции, разделяющей два помещения. После этого момента дополнительная звукоизоляция помещения, связанная с добавлением второго элемента ограждающей конструкции, больше не увеличивается с ростом частоты звука (рис. 8). Поэтому изоля-

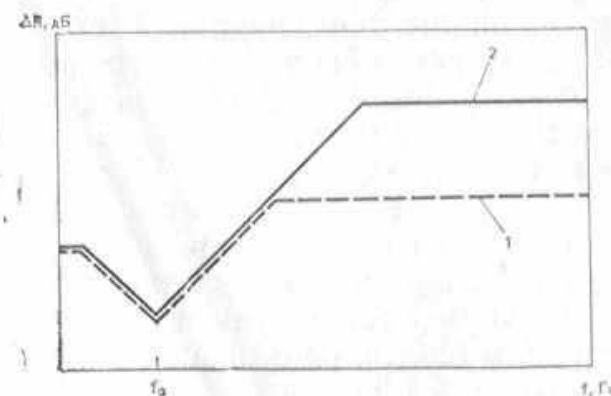


Рис. 8. Обобщенные частотные характеристики изменения изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией ΔR в связи с наличием в ней второго элемента или слоя:

1 — при большой интенсивности косвенной передачи звука; 2 — при малой интенсивности косвенной передачи звука

ция воздушного шума акустически неоднородной конструкцией заметно зависит от косвенной передачи звука в доме. При прочих равных условиях она тем больше, чем больше изоляция воздушного шума фланговыми конструкциями и меньше их площадь в изолируемом помещении.

Если между элементами акустически неоднородной конструкции имеются жесткие связи (из раствора, бетона, металла, дерева и т. п.), значительная часть звуковой энергии идет по ним в обход звукоизоляционной прослойки или промежутка. Возрастает и косвенная передача звука. Это заметно снижает звукоизоляцию помещений, разделенных такой конструкцией.

Если в ограждении есть сквозная щель (трещина), то происходит снижение изоляции воздушного шума, которое тем больше, чем больше площадь щели и меньше ее звукоизоляционные свойства по сравнению с теми же параметрами ограждения. Худшие звукоизоляционные свойства (наибольшее проникание звука) щель имеет на частотах собственных колебаний заключенного в ней воздуха. Частоты эти, как и в духовых музыкальных инструментах, определяются протяженностью «столба» воздуха. На собственных частотах изоляция воздушного шума щелью может иметь отрицательные значения, т. е. через щель может проходить больше звуковой энергии, чем через ту же площадь открытого пространства. Щель как бы засасывает и перекачивает звук. Уже при ширине 0,3 мм трещина начинает заметно ухудшать звукоизоляцию, и по мере увеличения ширины щели это ухудшение растет. У конструкций толщиной 12—16 см низшая резонансная частота щели f_{p1} составляет 1300—

1000 Гц. С увеличением толщины конструкции частота f_{pi} уменьшается и область ухудшения звукоизоляции смещается к середине нормируемого диапазона частот. Вследствие этого трещины и щели столь же опасны для толстых конструкций, как и для тонких.

Если щели соединяют воздух помещений с полостью внутри конструкции, то создается система «щель — полость — щель», которая работает, как известный резонатор Гельмгольца. Собственные частоты такой системы зависят от ширины и глубины щелей, от объема полости и располагаются, как правило, в области низких частот (менее 500 Гц). Так что щель может ухудшить звукоизоляцию и на высоких, и на низких частотах.

Возвращаясь теперь к причинам неудовлетворительной звукоизоляции в жилых домах, мы обнаружим, что в большинстве случаев в их основе лежат либо резонансы, либо косвенная передача звука, либо и то и другое. Проиллюстрируем это примерами [10]. На рис. 9 показано изменение изоляции воздушного шума ΔR в результате прохождения звука через сквозное отверстие в межквартирной стене с установленными в нем штепсельными розетками. Значения ΔR получены в результате двух измерений: конструкций с розетками, уплотненными специальными заглушками, и без заглушек. Хорошо виден резонансный характер ухудшения звукоизоляции. Наибольшее снижение звукоизоляции произошло вблизи низшей собственной частоты воздуха в отверстии.

Рассмотрим причины ухудшения изоляции воздушного шума вследствие укладки пола из линолеума на теплозвукоизолирующей основе на железобетонную плиту перекрытия. И тут главный виновник — резонанс. Низшая собственная частота такого двухслойного перекрытия пола около 500 Гц. Именно на этой частоте виден «резонансный провал» в частотной характеристике изменения изоляции воздушного шума ΔR в результате укладки пола из линолеума (рис. 10). Однако есть и второй виновник — косвенная передача звука. После «резонансного провала» ΔR начинает расти, и этот рост мог бы компенсировать потери звукоизоляции, вызванные резонансом. Но здесь рост звукоизоляции наталкивается на «потолок», предел, определяемый косвенной передачей звука по несущим стенам.

Ранее было показано, что этот «потолок» тем выше,

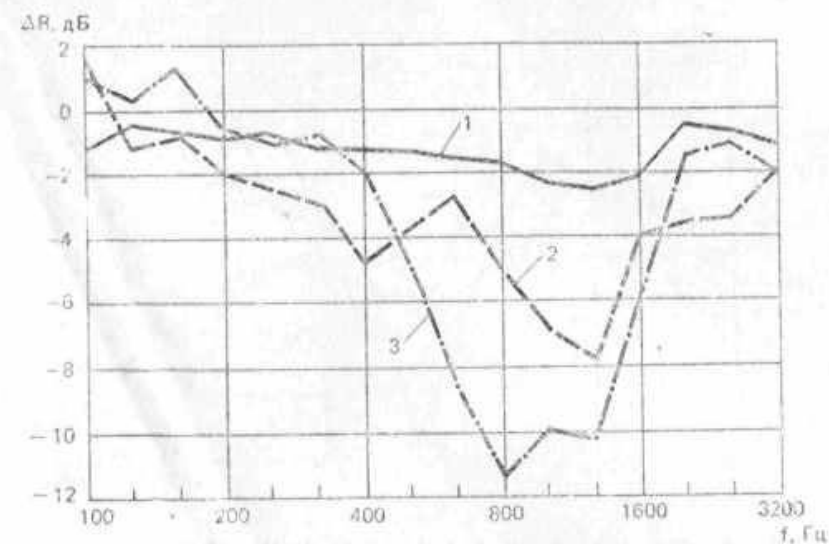


Рис. 9. Изменение изоляции воздушного шума ΔR в результате прохождения звука через отверстие в стене с установленными в ней электрическими розетками: 1 — стена из железобетонной панели толщиной 16 см в доме серии 111-121; 2 — стена из железобетонной панели толщиной 18 см в доме серии 11-60; 3 — стена из двух железобетонных панелей толщиной по 12 см, разделенных деформационным швом в доме серии 111-90

чем больше изоляция воздушного шума фланговыми конструкциями и чем меньше их площадь в изолируемом помещении. В рассматриваемом случае фланговые конструкции, по которым идет косвенная передача шума, — это внутренние несущие стены. Несущие перегородки, которые слабо связаны с перекрытием, и наружные стены, имеющие, как правило, значительно большую толщину, чем внутренние, добавляют здесь так мало, что ими можно пренебречь. При перекрытиях малого пролета площадь несущих стен в помещении примерно в 2 раза больше, а средняя толщина их меньше, чем при перекрытиях большого пролета. Этим и объясняется, почему изоляция воздушного шума перекрытиями с полом из линолеума на теплозвукоизолирующей основе лучше при большом их пролете, чем при малом.

Яркий пример совместного отрицательного воздействия на звукоизоляцию резонанса и косвенной передачи звука приведен на рис. 11. На нем показаны частотные характеристики изоляции воздушного шума межквартирными стенами из кирпича, оштукатуренными с двух сторон, толщиной около 40 см. В этом доме применены

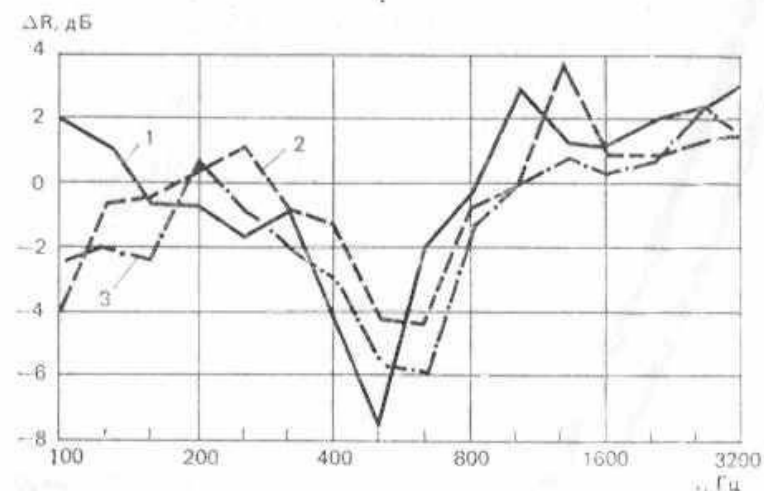


Рис. 10. Изменение изоляции воздушного шума ΔR в результате укладки линолеума на теплозвукоизолирующей основе на перекрытие:

1 — из сплошных панелей толщиной 14 см в доме серии 1-464-ЛТ; 2 — из сплошных панелей толщиной от 16 до 20 см в доме серии 111-121; 3 — из многопустотных плит толщиной 22 см со стяжкой толщиной 4 см в доме 16-3А

легкие наружные стены из панелей с деревянным каркасом, обшивками из асбестоцементных плит и утеплителем из минераловатных плит. В одном случае межквартирная стена подходит к наружной стене в месте шва между легкими панелями (который препятствует косвенной передаче звука по ним), во втором случае — в средней части панели размером на две комнаты. Косвенная передача звука по внутренней обшивке панели наружной стены резко ухудшила звукоизоляцию помещений. Наибольшее ухудшение произошло на частотах, соответствующих пространственно-частотному резонансу асбестоцементных листов толщиной 10 мм (2500 Гц). За два года эксплуатации произошло дополнительное ухудшение звукоизоляции в месте примыкания межквартирной стены к наружной, что объясняется отсутствием должной герметизации этого стыка. Таким образом, большой запас звукоизоляции кирпичной стены был полностью исчерпан.

Наиболее частый дефект при устройстве отдельных слоистых полов, приводящий к неудовлетворительной звукоизоляции, — жесткая связь настила досок или щитов, монолитного или сборного бетонного основания пола со стенами и перегородками. Зазор между ними, предусмотренный типовыми решениями полов, либо во-

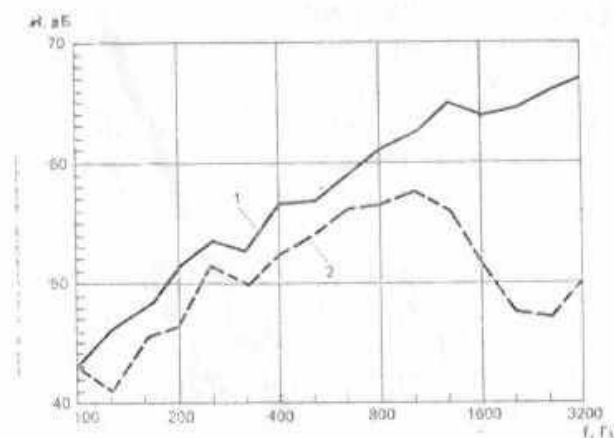


Рис. 11. Частотные характеристики изоляции воздушного шума R кирпичными стенами:

1 — при примыкании к наружной стене из легких панелей в месте стыка; 2 — при примыкании к наружной стене в средней части легкой панели размером на две комнаты

все отсутствует, либо заполнен твердыми материалами (строительным мусором, раствором и т. д.). Образовавшиеся жесткие мостики нарушают основной принцип работы такого перекрытия — увеличивают косвенную передачу звука.

Данные, приведенные в этой главе, позволяют так ответить на поставленный ранее вопрос о целесообразных направлениях совершенствования нормирования звукоизоляции.

1. Не во всех строящихся домах фактическая звукоизоляция соответствует нормам. Прежде чем ставить вопрос об усилении действующих требований, необходимо обеспечить их повсеместное и безусловное выполнение. На достижение этой цели и должно быть направлено совершенствование норм.

2. Если исключить применение проектных решений, заведомо не обеспечивающих требуемую звукоизоляцию (межквартирные стены толщиной 14 см, перекрытия из панелей толщиной 14 и 16 см с линолеумом на теплозвукоизолирующей основе в домах с малым шагом несущих стен), то большинство остальных случаев неудовлетворительной звукоизоляции связано с нарушениями проекта при выполнении так называемых скрытых работ. Это уплотнение стыков, отверстий, мест пропуска инженерных коммуникаций, устройство звукоизоляционной прослойки и примыканий пола к стенам и т. д. Доброкачественное выполнение этих работ возможно только на основе инструментального контроля звукоизоляции в строящихся и сдаваемых в экс-

плуатацию домах. Поэтому совершенствование норм должно идти в направлении обеспечения такого контроля (этому посвящен следующий раздел брошюры).

Каковы же пути улучшения звукоизоляции нашего жилища, направленные на устранение отмеченных дефектов и улучшение технико-экономических показателей конструкций?

Применение систем скрытой электропроводки, не требующей сквозных отверстий в элементах стен и перекрытий, — наиболее целесообразный путь устранения связанных с этим дефектов звукоизоляции. Это системы с плинтусной разводкой проводов, с использованием пластмассовых трубок и коробок, закладываемых в формы до бетонирования панелей, отдельных каналов и несквозных гнезд в панелях и др. Это применение эластичных гильз, например из асбестового картона, асбестового шнура, для пропуска трубопроводов через конструкции. Это герметизация стыков внутренних конструкций, в которых во время эксплуатации возможны взаимные перемещения сопряженных элементов... Чтобы проектировщик применял такие решения, которые могут быть и дороже, расчет звукоизоляции по СНиПу должен учитывать ее ухудшение в случае использования более дешевых, но менее надежных решений. Это тоже необходимое направление совершенствования норм.

Успешное использование линолеума на теплозвукоизолирующей основе возможно, но по несущим плитам перекрытия, преимущественно большого пролета, имеющим запас изоляции воздушного шума. Наиболее целесообразно увеличение изоляции воздушного шума несущими плитами перекрытия путем повышения их жесткости без увеличения массы. В перекрытиях большого пролета это достигается переходом от плит сплошного сечения толщиной 16 см к плитам с круглыми пустотами толщиной 22 см с приведенной толщиной бетона 15—16 см. Приведенная толщина бетона в них увеличена (по сравнению со стандартными плитами) в результате уменьшения сечения пустот и увеличения их шага (утолщения ребер между пустотами). Непосредственная укладка покрытия пола по таким плитам становится возможной при изготовлении калиброванных плит и их монтаже с выравниванием по верхней поверхности. Испытания таких перекрытий в домах серии 467А в Лыткарино и серии 141-СВ в Свердловске дали вполне удов-

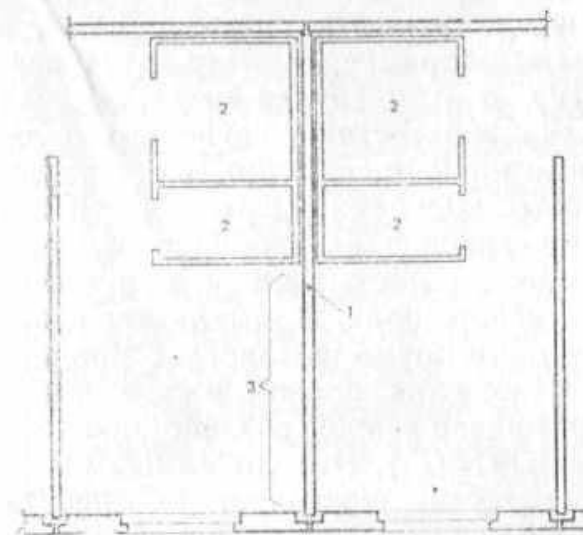


Рис. 12. Пример планировочного решения, при котором часть панели межквартирной стены не подвергается воздействию звукового поля: 1 — панель межквартирной стены; 2 — объемная санитарно-техническая cabina; 3 — часть панели, подверженная воздействию звукового поля

летворительные результаты. В них индексы изоляции воздушного шума перекрытиями составили 51—52 дБ. Это направление совершенствования перекрытий способствует также снижению расхода стали на армирование панелей.

Один из способов дальнейшего уменьшения расхода бетона в плитах перекрытия — заполнение их пустот сыпучими материалами (песком, керамзитом и т. п.). Это дополнительно увеличивает звукоизоляцию благодаря значительным потерям звуковой энергии в сыпучих материалах. В настоящее время разрабатывается ряд конструкций пустотно-засыпных плит перекрытий, изготовляемых в едином производственном цикле (заполнение пустот совмещается с процессом бетонирования).

Улучшение технико-экономических характеристик перекрытий с отдельными полами при обеспечении требуемой звукоизоляции возможно путем использования индустриальных конструкций пола (паркетных щитов и досок, щитов из мягкой модифицированной древесины, сборных бетонных оснований пола) и эффективных звукоизоляционных материалов (пенополистирольных, минераловатных плит и т. п.).

Повышение технико-экономической эффективности межквартирных стен возможно с помощью конструктивных, технологических и планировочных приемов. Изоляция воздушного шума панельной межквартирной стеной может быть улучшена при таком конструктивно-планировочном решении, когда только часть панели распо-