

АКУСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОМЕЩЕНИЯХ ПРИ ОТКРЫВАНИИ ДВЕРЕЙ И ОКОН И ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ ПОМЕХ

О.В. Кудрявцев

Введение.

Начиная с 1985 г. за рубежом стали появляться публикации (см., например, [1]) о ранее неизученном эффекте – возникновении сверхнизких звуковых (инфразвуковых) колебаний, образующихся в закрытых помещениях при открывании дверей или окон, и прикладном его использовании для создания прибора-обнаружителя (извещателя) вторжения в помещение.

Целью настоящей работы явилось получение амплитудных, временных и спектральных характеристик инфразвуковых сигналов, возникающих в закрытых помещениях при их вскрытии, а также внешних акустических помех. Указанные характеристики необходимы при разработке технических требований к прибору извещателю вторжения.

Основные проблемы, которые необходимо решить, следующие:

1. Определение основных параметров акустических сигналов в различных помещениях при открывании дверей и окон.
2. Аналитическая оценка параметров инфразвукового сигнала для модели закрытого помещения.
3. Определение основных параметров акустических полей в инфразвуковом и низкочастотном звуковом диапазоне частот.

1. Основные сведения об инфразвуковых процессах в помещениях.

В последнее время интерес к инфразвуковым процессам, возникающим в различного рода помещениях и сооружениях, значительно возрос. Это связано в первую очередь с ростом загрязнения окружающей среды звуковыми волнами, в том числе и инфразвуком. В архитектурной и строительной акустике не выделен круг задач, характерный для инфразвука. Существующие немногие работы не имеют исчерпывающего характера, [2–5], а такие вопросы, как звукоизоляция строительных конструкций на инфразвуковых частотах, оценка добротностей помещений на их резонансных частотах исследованы крайне мало. Наиболее широко в литературе освещаются вопросы возникновения инфразвуковых колебаний в помещениях, вызванных внешними источниками, такими, как звуковой хлопок от пролетающих сверхзвуковых самолетов, обтекание высотных зданий сильными порывами ветра, шум механизмов и машин на инфразвуковых частотах [2, 6–8]. Пути проникновения инфразвуковых

волн в помещения могут быть различными: через ограждающие конструкции (стены, окна, двери), по воздуховодам, через перекрытия и непосредственно от источника, если он находится в помещении. Так как типичные помещения (как жилые, так и рабочие) имеют сравнительно большие линейные размеры, в них могут возникнуть резонансные явления на низких частотах. Различают два рабочих механизма возникновения резонансных колебаний в помещениях

- волновой резонатор, связанный с наличием ограждающих поверхностей. Резонансную частоту f в Гц можно приближенно определить по формуле (для прямоугольного помещения):

$$f = 170 \sqrt{\left(\frac{n_1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{l_3}\right)^2},$$

где $n = 1, 2, 3$; l_1, l_2, l_3 – расстояние в метрах между ограждающими поверхностями.

- объёмный резонатор (Гельмгольца), для которого необходимо наличие какого либо отверстия (с горлом или без него) в замкнутом объёме. Резонансная частота определяется формулой

$$f = 55 \sqrt{\frac{S}{h_3 V}}, \quad (1.1)$$

где S – площадь окна или двери (м^2), V – объём помещения (м^3), $h_3 = h + 0,8\sqrt{S}$ – эквивалентная площадь (окна, двери, отверстия), h – длина горла.

Эти два механизма возникновения резонансных частот в помещениях работают одновременно и в зависимости от того, в каком состоянии находится помещение (открыты или закрыты окна, двери; наличие воздуховодов, вентиляции), степень возникновения резонансных явлений может быть различна и достигать в определенных обстоятельствах значительных уровней. Точный расчет резонансных частот в помещениях возможен только для геометрически простых помещений и простых краевых условий. Существующие приближённые расчёты крайне громоздки и могут осуществляться только на компьютере. К нерезонансным колебаниям внутри закрытых помещений могут быть отнесены инфразвуковые импульсы, возникающие при открывании дверей, окон, форточек и т.п. (как отмечено во Введении).

При приёме инфразвуковых сигналов всегда возникают трудности, связанные с постоянным наличием инфразвукового фона. Он может быть обусловлен шумом обтекания приёмника, турбулентностью среды, температурными флуктуациями, а также изменениями атмосферного давления, поэтому при измерениях инфразвуковых сигналов особое внимание уделяется способам обработки.

Известно [1, 9, 10], что в замкнутом помещении при открывании двери или окна образуется скачок атмосферного давления, проявляющийся в виде знакопеременного акустического импульса.

Этот импульс быстро затухает со временем, его максимальная амплитуда зависит от объёма помещения, а спектр его лежит в области частот, не превышающих 5 Гц.

Это явление было положено в основу акустического способа обнаружения вторжения в помещение.

Для разработки технических требований к прибору-извещателю вторжения возникла необходимость более детального рассмотрения низкочастотных импульсов, возникающих в закрытых помещениях при открывании двери или окна. Результаты экспериментальных исследований временных и спектральных характеристик таких сигналов и акустических помех для помещений различного объёма и резной скорости открывания окон и дверей, приведены в следующих разделах настоящей работы.

2. Проработка рабочей гипотезы, построение модели инфразвукового процесса в помещении. Расчет параметров процесса.

При построении модели акустического инфразвукового процесса в помещении необходимо прежде всего разрешить вопрос о том, является ли этот процесс колебательным, или он имеет релаксационный характер.

Данные предварительных экспериментов свидетельствовали о наличии и преобладании в одних случаях процессов первого типа, в других – второго. В результате анализа большого количества экспериментального материала можно сделать следующие выводы:

1. Процесс имеет колебательный характер в случае очень резкого открывания двери, когда в спектре силового воздействия сильно выражены "высокие" (4-6 Гц) частоты, на которые помещение отзывается как резонатор Гельмгольца. При этом максимальное пиковое значение импульса близко к своему пределу, оценка которого давалась в работе [9] и которое определяется максимально возможной для данного помещения степенью сжатия воздуха.

2. При медленном открывании двери спектр воздействия хотя и содержит частоты резонанса Гельмгольца, но осцилляции малы и замаскированы процессами релаксационной природы, т.е. динамической компенсацией разрежения (или сжатия), втекающим (или вытекающим) через изменяющуюся во времени щель воздухом.

По-видимому, разработка модели второго механизма является более предпочтительной в практическом отношении, поскольку вторжение в охраняемые помещения производится во многих случаях с известной осторожностью. Кроме того, расчет по релаксационной модели должен давать приемлемую оценку максимальной величины импульса как для малой, так и для большой скорости открывания двери, хотя расчетный спектр его во втором случае может отличаться от истинного.

Расчет динамики релаксационного акустического процесса (например, при открывании двери внутрь помещения) выполнялся при следующих допущениях:

- инерционные эффекты при нестационарном протекании воздуха через дверную щель пренебрежимо малы;

- процесс течения воздуха в щели квазистатический.

Опустив сами расчёты, приведённые в работе [10], перейдем к описанию результатов расчетов и оценим роль каждого из параметров процесса. Акустический релаксационный процесс, как указано в работе [10], полностью определяется следующими четырьмя величинами:

а. $\frac{H/R_0}{V_0/R_0^3} \approx 2 \cdot \left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{\delta V_\varphi}{V_0} \right)$ – отношение нормированной высоты двери к нормированному

объёму помещения и представляет собой удвоенную степень сжатия воздуха в помещении в расчёте на единичный угол поворота двери при отсутствии перетекания воздуха через щели. Здесь H – высота двери; V_0 – объём помещения с закрытой дверью; $\varphi(t)$ – угол поворота двери, т.е. функция, выражающая закон открывания двери в зависимости от времени; δV_φ – изменение объёма воздуха в помещении при открывании двери на угол φ ; R_0 – ширина двери (см. Рис.1).

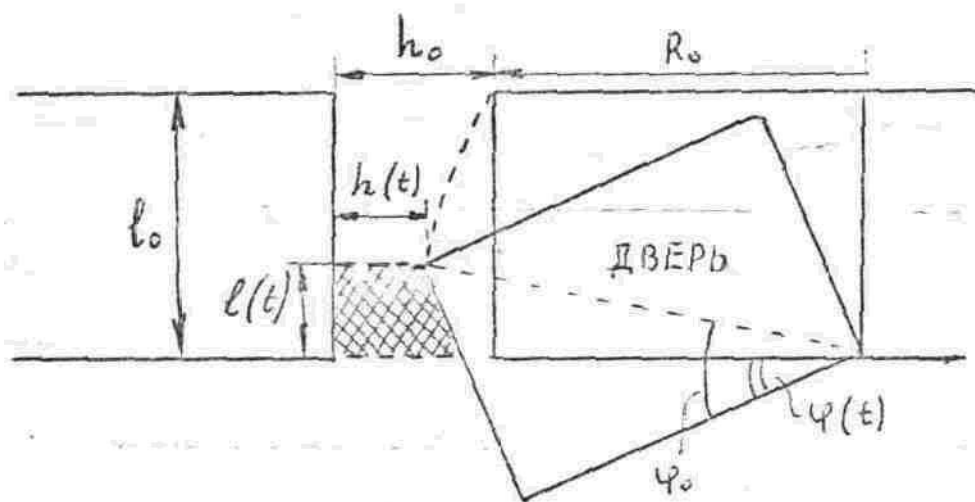


Рис. 1

Расчетная схема двери в проёме (вид сверху; вертикальный масштаб для наглядности растянут).



– область вязкого течения

б. h_0/R_0 – начальный зазор двери, нормированный к её ширине;

в. l_0/R_0 – толщина двери, нормированная к её ширине.

Оба эти параметра характеризуют гидравлическое сопротивление дверной щели.

г. $\frac{\sum_i Y_i}{V_0}$ – нормированная к единице объёма помещения величина суммарной

проводимости щелей утечки. В хорошо герметизированном помещении $\sum_i Y_i = 0$.

1. Варьируя значение параметра «а» при неизменных остальных, было получено семейство кривых, анализ которого привёл к очевидному выводу о том, что с увеличением объёма помещения при прочих равных условиях амплитуда импульса падает. Менее очевидной является медленность спада амплитуды с увеличением объёма помещения. Так при его увеличении в 25 раз амплитуда упала всего в 1,2 раза. Этот факт имеет важное практическое значение, поскольку обосновывает возможность применения извещателя в помещениях большого объёма при малых размерах двери (если отвлечься от влияния помех).

При увеличении объёма меняется также и форма импульсов – передние фронты их становятся более пологими, что можно объяснить меньшей степенью сжатия на начальном этапе движения двери, когда утечка воздуха через дверную щель ещё незначительна.

2. Увеличение начального зазора h_0/R_0 снижает амплитуду импульса (растёт утечка) и делает его форму более симметричной.

3. Возрастание параметра l_0/R_0 , определяющего длину канала вязкого течения, как и следовало ожидать, увеличивает амплитуду импульса и его длительность.

4. Влияние параметра «г» мы оценили, введя в расчёт проводимость одной щели утечки, формально изменяя её площадь. В результате получена кривая, характеризующая уменьшение амплитуды импульса при различной степени разгерметизации помещения. Эта зависимость является одной из самых разных, поэтому практически важно для каждого помещения знать величину проводимости всех видов щелей и вытяжек (вентиляции).

На Рис. 2 нанесены графики зависимости амплитуды импульса P от вышеперечисленных параметров: объёма помещения V_0 , толщины двери l_0 , толщины дверной щели h_0 , средней скорости открывания двери v .

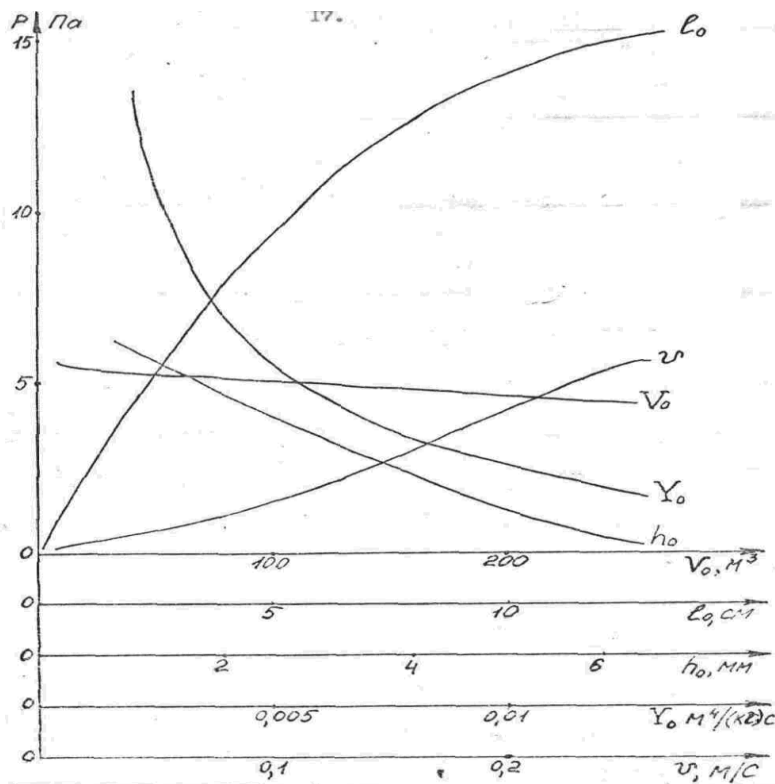


Рис. 2

Зависимость амплитуда давления импульса от объёма помещения V_0 , толщины двери l_0 , ширины дверной щели h_0 , проводимости утечки Y_0 и средней скорости открывания двери v .

В заключении раздела представляется важным обсудить достоинства и недостатки предложенного метода расчёта и дать рекомендации по его использованию.

Основным преимуществом метода, на наш взгляд, является возможность изучения динамических характеристик акустического процесса при открывании двери по произвольному закону с учётом изменяющихся во времени параметров дверной щели. С его помощью было показано, что релаксационный акустический процесс полностью определяется четырьмя независимыми параметрами – то есть числом, меньшим по сравнению с полной совокупностью характеристик помещения, а также был выяснен физический смысл каждого из них. Метод позволяет составить достаточно полное и ясное представление о качественной стороне процесса и определить направленность, степень выраженности и законы изменений его характеристик при вариации каждого из параметров.

Однако не следует забывать о лежащих в основе метода допущениях. Они должны проявляться, по нашему мнению, в области больших скоростей движения двери, где нельзя пренебрегать кинетической энергией (т.е. массой) протекающего через щели воздуха, и где в спектре воздействия имеются частоты резонанса Гельмгольца помещения.

Как показали расчёты, амплитуда импульса наиболее чувствительна к изменению величины

проводимости щелей утечек (если считать закон $\varphi(t)$ заданным). Однако, если толщину и зазор двери легко измерить, то рассчитать гидравлическое сопротивление вытяжки представляет серьёзную трудность, поскольку вентиляционные ходы имеют множество ответвлений, колен, решёток, не говоря уже о том, что благодаря вентиляции соседние помещения в здании акустически связаны. Поэтому основное внимание при расчётах должно уделяться по возможности более точному вычислению величины суммарной проводимости щелей и вытяжек.

Дальнейшее совершенствование расчётной схемы исследуемого процесса, на наш взгляд, должно проводиться в направлении учёта инерционных свойств движущегося в щелях воздуха, что, видимо, приведёт к повышению порядка дифференциального уравнения и проявлению резонансных свойств помещения. Целесообразно было бы также учесть в расчёте влияние того помещения, с которым через дверь сообщается исследуемое. Есть основания предполагать, что при близких размерах обоих помещений амплитуда импульса может существенно отличаться от таковой в случае, когда дверь открывается в открытое пространство (что мы предполагали в нашем расчёте).

3. Экспериментальные исследования инфразвуковых сигналов при открывании дверей и окон в закрытых помещениях.

3.1. Общая методика проведения исследований.

Основная блок-схема измерений приведена на Рис. 3.

Микрофон 1 типа 4147 фирмы Брюль и Кьер с микрофонной системой 2 на несущей частоте 2631, устанавливался в произвольном месте внутри исследуемого помещения, чувствительность всего приемного тракта составляла 20 мВ/Па. Нижняя граничная частота - 0,1 Гц. Электрический сигнал с выхода предварительных усилителей подавался вначале на усилитель 3 с фильтром низких частот для уменьшения влияния высокочастотной помехи, а затем на один из каналов двухканального спектроанализатора 4 типа 2034. Частотное разрешение спектроанализатора 4 (полоса анализа Δf_0) определялось длительностью реализации T_0 : $\Delta f_0 = 1/T_0$. На другой канал спектроанализатора подавался электрический сигнал с отметчика положения двери б (или окна). Этот отметчик позволял определять начало открывания двери и момент прохождения края двери заданного расстояния от начала открытия, т.е. определять среднюю скорость открывания двери.

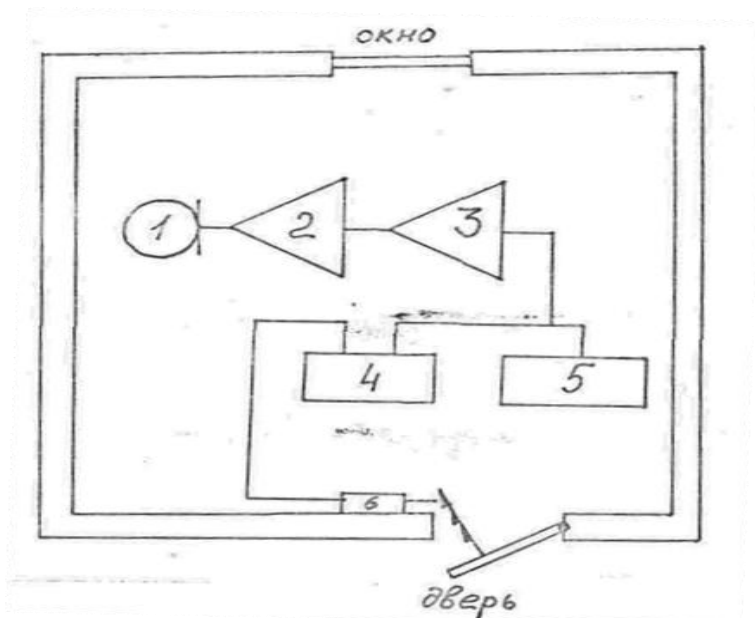


Рис. 3 Блок-схема эксперимента:

- 1 - микрофон;
- 2 - предварительный усилитель
- 3 - фильтр – усилитель;
- 4 - спектроанализатор;
- 5 - магнитограф;
- 6 - датчик положения двери.

Таким образом, на экране спектроанализатора одновременно изображались временная развёртка принятого импульса и сигнал отметки положения двери. Оба сигнала (импульса и отметки) параллельно записывались на магнитографе 5 типа 7005. Дверь открывалась вручную с разной скоростью. После записи на регистраторе временной развертки проводился спектральный анализ в узкой и $1/3$ – октавной полосах, и полученные спектры также выводились на регистратор. На Рис.4 приведены примеры прямых записей временной развертки и спектра акустического сигнала с разрешением 0,0313 Гц.

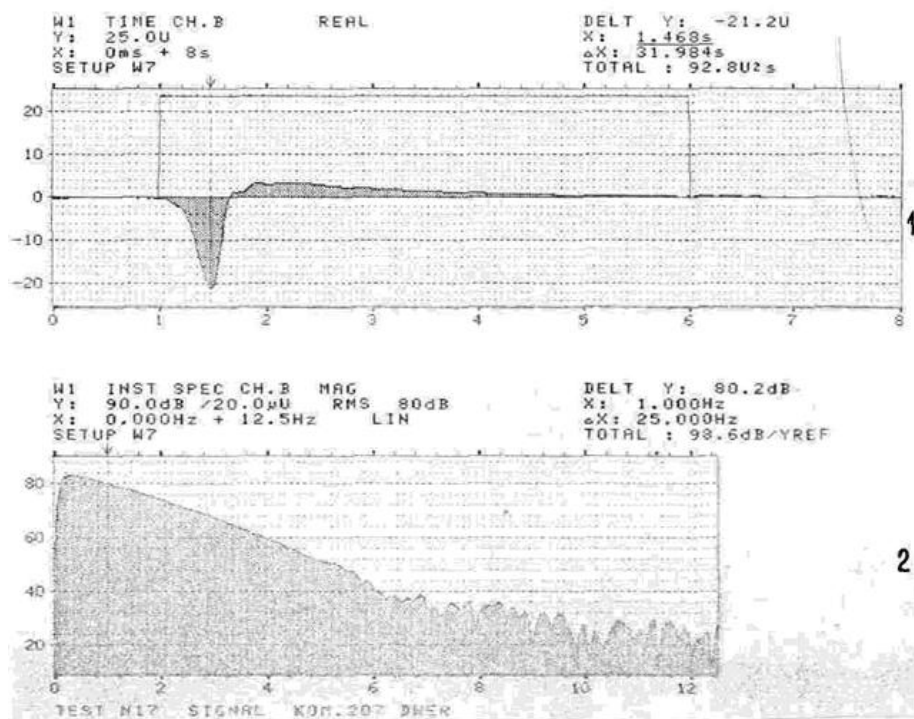


Рис. 4. Импульс в помещении № 2.

Скорость открывания двери – 19 см/сек.;

1 – временная развёртка, давление; 2 – спектр, узкополосный анализ.

Во избежание влияния помех на сигналы малого уровня, получающиеся при медленном открывании двери, обработке подвергался участок записи, вырезанный временным окном длительностью, равной длительности сигнала. при этом передний фронт временного окна совпадал с началом открывания двери, а положение заднего фронта определялось моментом окончания сигнала, т.е. временем, при котором амплитуда сигнала спадала не менее, чем в 10 раз по сравнению с максимальным значением. На временной развёртке Рис. 4, например, изображено временное окно длительностью 5 сек. с началом в момент времени 1 сек. (для наглядности временная развёртка задержана на 1 сек. относительно начала открывания двери). Полоса спектрального анализа независимо от длительности временного окна сохранялась постоянной и определялась только длиной всей реализации, занесённой в память спектроанализатора (порядка 16 сек.) Следует отметить, что в отсутствие помехи увеличение длины временного окна вплоть до конца всей реализации существенно не изменяло форму спектра сигнала в его энергонесущей частотной полосе, что было проверено экспериментально для сигналов большого уровня.

Такие записи были получены для четырёх основных типоразмеров рабочих помещений: 109 м² x 3,77 м (помещение № 1) 18 м² x 3,8 м (№ 2) 5,9 м² x 2,71 м (№ 3) и 3,46 м² x 2,71 м (№ 4). В помещении № 1 акустические импульсы создавались открыванием наружу двери площадью 2,29 x 0,88 м² толщиной 4 см (дверь № 1) и двери площадью 1,99 x 0,895 м² толщиной 3,7 см (дверь № 3), а также открыванием внутрь двери № 2, такой же по габаритам, как и первая дверь, но имевшую

большую щель между дверью и дверной коробкой.

В помещении № 2 импульс создавался открыванием наружу двери размерами $2,0 \times 0,92 \text{ м}^2$ толщиной 6 см, в помещении № 3 – открыванием внутрь двери $2,0 \times 0,81 \text{ м}^2$ толщиной 4,5 см. в помещении № 4 – открыванием наружу двери $2,0 \times 0,805 \text{ м}^2$ толщиной 4,5 см.

В помещении № 1 имелись вентиляционные отверстия общей площадью около $0,5 \text{ м}^2$. В помещении № 2 вентиляционное отверстие имело площадь около $0,2 \text{ м}^2$. В помещениях 3 и 4 вентиляция отсутствовала; в помещении 3 вентиляцию можно было имитировать открыванием форточки площадью $0,35 \times 0,35 \text{ м}^2$. В помещении 4 имелись щели из-за неплотного прилегания закрытых дверей. В помещениях 1 и 2 можно было увеличивать площадь вентиляции открыванием фрамуг размерами $1,07 \times 0,41 \text{ м}^2$.

Исследований импульсов, образующихся в помещении путём открывания окон или форточек, не проводилось, поскольку, во-первых, такие опыты были проделаны в работе [9], а во вторых, принципиально нового, не считая уменьшения амплитуды сигнала, по сравнению с акустическими процессами, возникающими в помещениях при открывании дверей, не наблюдалось.

3.2. Моделирование и экспериментальное исследование характеристик акустических помех.

При исследовании проникновения сигнала или помехи внутрь исследуемого закрытого помещения из другого помещения или открытого пространства (снаружи) в другом помещении или снаружи дополнительно устанавливался ещё один микрофон, сигнал с которого в качестве опорного подавлен на другой канал спектроанализатора (при этом отметчик положения двери был отключён), и проводилась параллельная запись с обоих микрофонов.

На Рис. 5 и 6 показаны соответственно временные развёртки сигналов и их спектров в двух помещениях, разделённых закрытой дверью. На нижнем графике Рис. 5 показан импульс в наружном помещении, созданный открыванием двери в открытое пространство. На верхнем графике импульс, прошедший из наружного помещения в исследуемое через закрытую дверь. Такие записи были получены при разной степени открытия фрамуги в исследуемом помещении. Амплитуда импульсов в наружном помещении менялась в пределах от 12 до 15 Па.

Были проделаны эксперименты по исследованию проникновения внутрь помещения искусственно создаваемой снаружи (за окном) импульсной помехи. Для этой цели использовались выстрелы от стартового пистолета и подрывы воздушных шариков, наполненных кислородно-ацетиленовой смесью. Несмотря на большую амплитуду этих импульсов (до нескольких сотен Па для шариков), их спектры оказались более высокочастотными по сравнению со спектрами импульсов, образующихся в результате

открытия окна или двери, и спектральные уровни первых в области частот ниже 20 Гц приближались к уровню атмосферных шумов. В связи с этим результаты таких опытов, как малоинтересные для использования их в нашей задаче, здесь не приводятся.

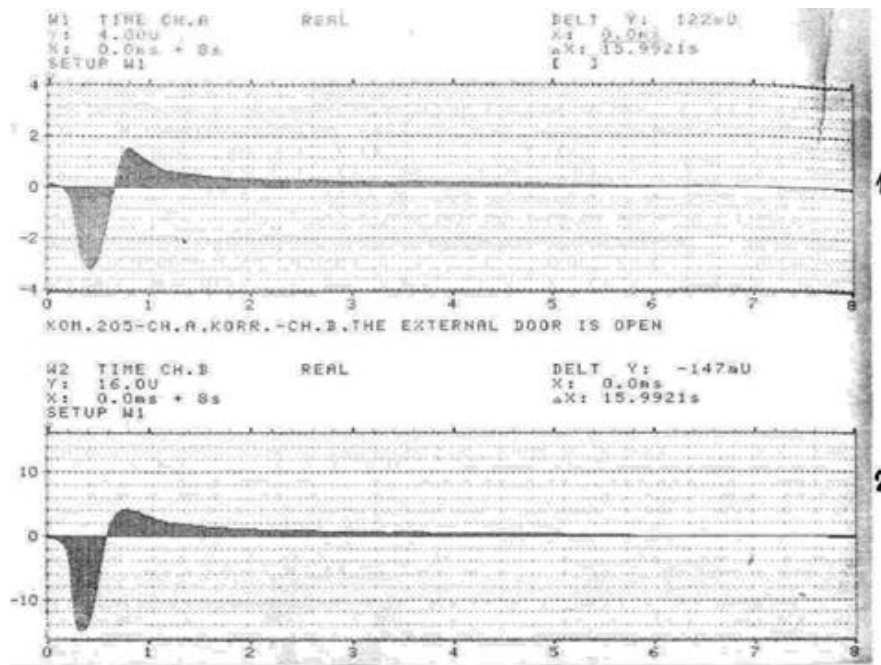


Рис. 5. Прохождение импульса в закрытое помещение из другого помещения:

- 1 - импульс внутри исследуемого помещения;
- 2 - исходный импульс в другом помещении.

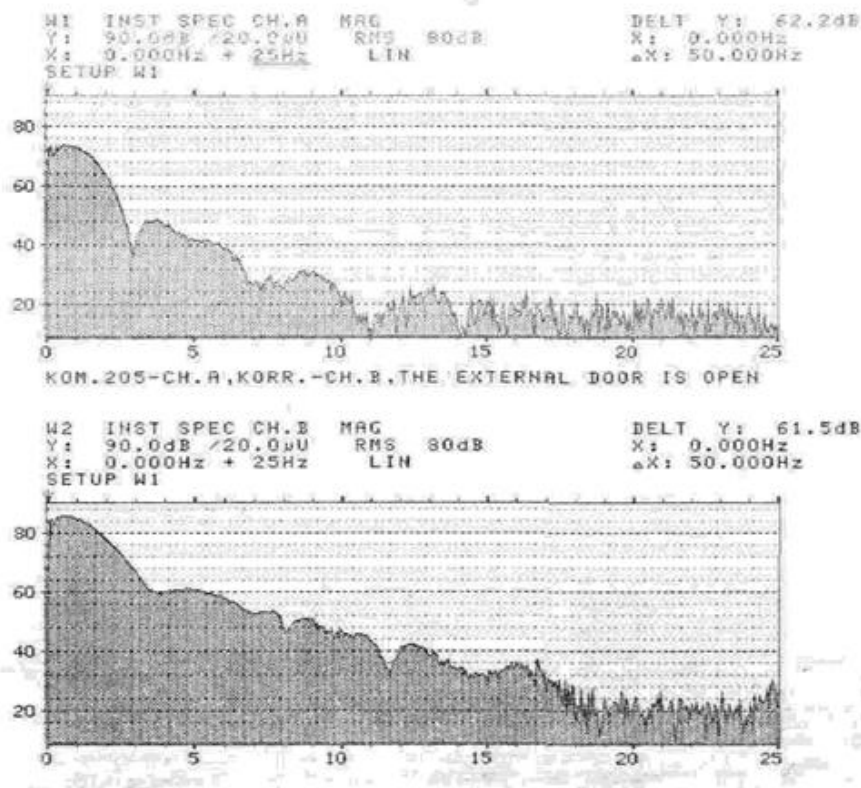


Рис. 6. Спектры импульсов, изображённых на Рис.5.

Более значительными с точки зрения проникновения в помещения и помехоустойчивости прибора – извещателя могут явиться, на наш взгляд, импульсы-хлопки от пролетающих сверхзвуковых самолетов. Сведения по амплитудно-частотным характеристикам таких импульсов как снаружи, так и внутри помещений, приведены в работе [8].

3.3. Обработка экспериментальных результатов.

Записи, аналогичные рис.4, обрабатывались следующим образом. Считывались и наносились на графики амплитуды первого выброса и ширина полосы энергонесущей части спектра инфразвуковых импульсов (частота, при которой спектр спадает на 20 дБ относительно максимального значения) в зависимости от средней скорости открывания двери для разных помещений при закрытой и открытой фрамуге (форточке). На Рис.7 –10 представлены такие зависимости.

При исследовании естественной непрерывной помехи (атмосферных шумов) в закрытых помещениях для сопоставления спектральных уровней таких различных по характеру процессов, кратковременный одиночный полезный импульс и непрерывная помеха, спектры последней определялись усреднением (в основном, по 16 или 32 реализациям) в таком же временном окне, которое использовало при выделении импульса. Если же осуществлялась длительная запись помехи, то её спектры приводились по уровню к такому же временному окну и той же полосе анализа.

Определение превышения сигнала над помехой возможно несколькими способами, зависящими от конечной цели исследований.

В одном случае отношение сигнал/помеха, определяется отношением энергий импульса и помехи на длине импульса в энергонесущей полосе частот полезного сигнала.

Этот способ удобен при обнаружении полезного сигнала методом накопления.

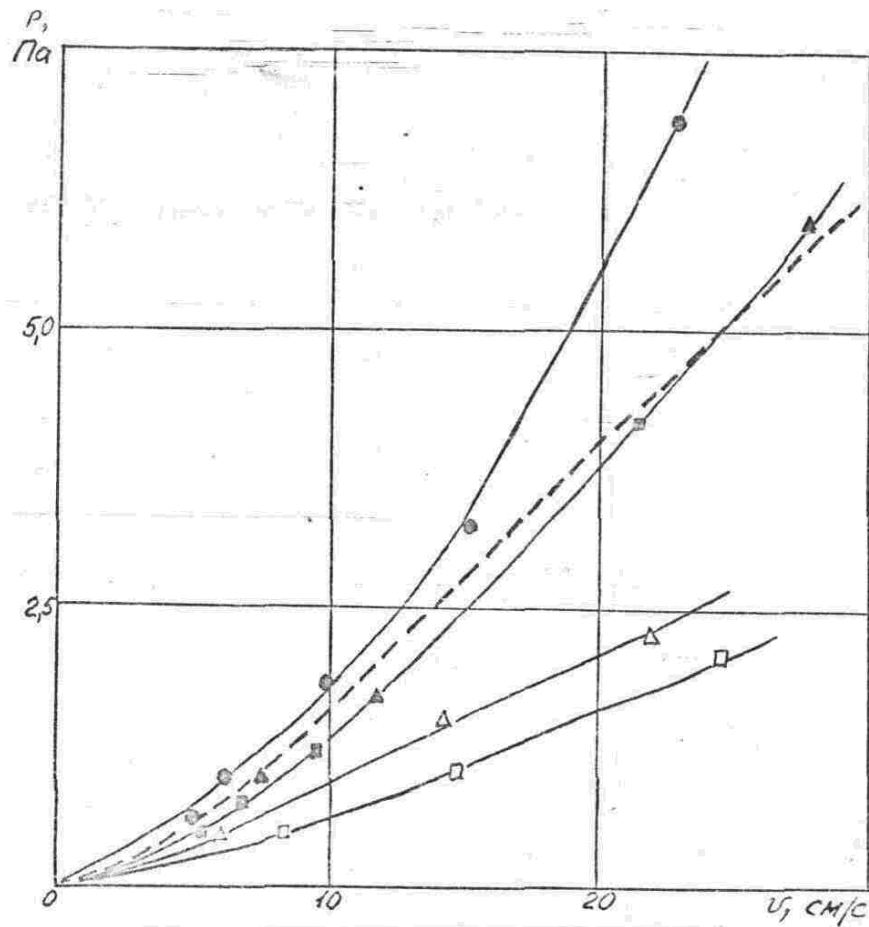


Рис. 7. Зависимость амплитуды импульса от средней скорости открывания дверей в помещении 1.

- — дверь 1 (окна закрыты);
- ▲—▲ — дверь 2 (окно закрыто); △—△ — дверь 2 (окно открыто);
- — дверь 3 (окно закрыто); □—□ — дверь 3 (окно открыто);
- расчетная кривая для данного помещения.

Размеры окна 1,07 x 0,41 м²; Ширина дверной щели 3 мм;

Площадь вентиляционного отверстия ≈ 12,2 см².

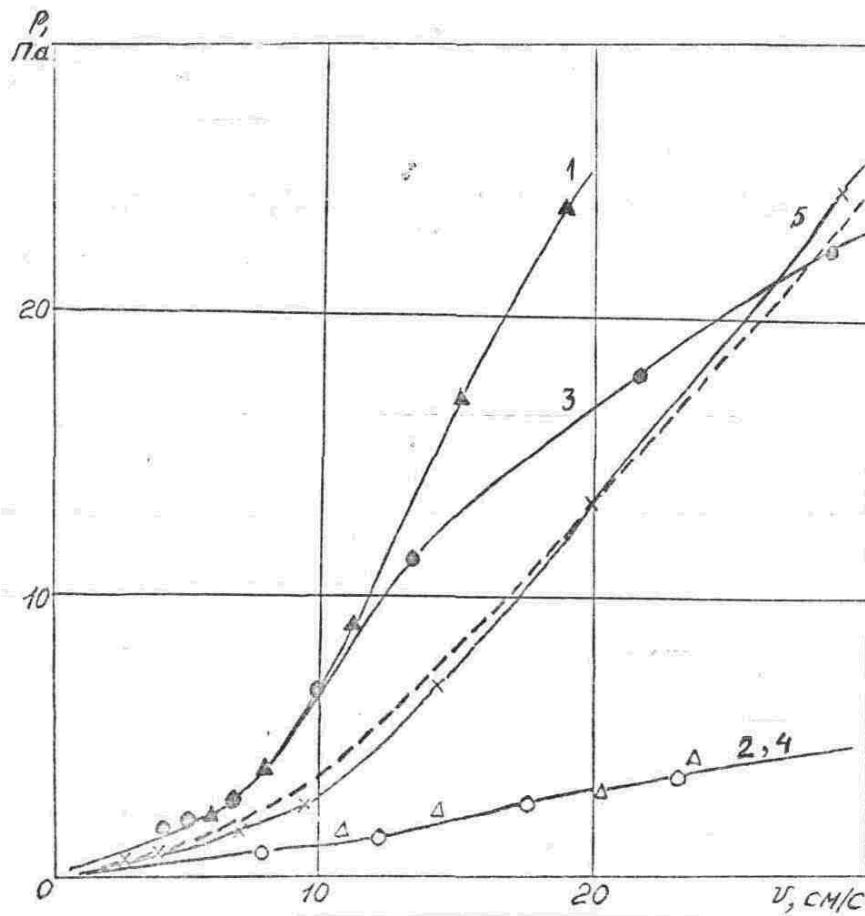


Рис. 8. Зависимость амплитуды импульса от средней скорости открывания двери.

▲—▲ — помещение 2 (окно закрыто); △—△ — помещение 2 (окно открыто);

●—● — помещение 3 (окно закрыто); ○—○ — помещение 3 (окно открыто);

x—x — помещение 4 (окно закрыто);

----- расчётная кривая для помещения 4.

Ширина дверной щели 2 мм.

Общая площадь вытяжных щелей $\approx 8,2 \text{ см}^2$.

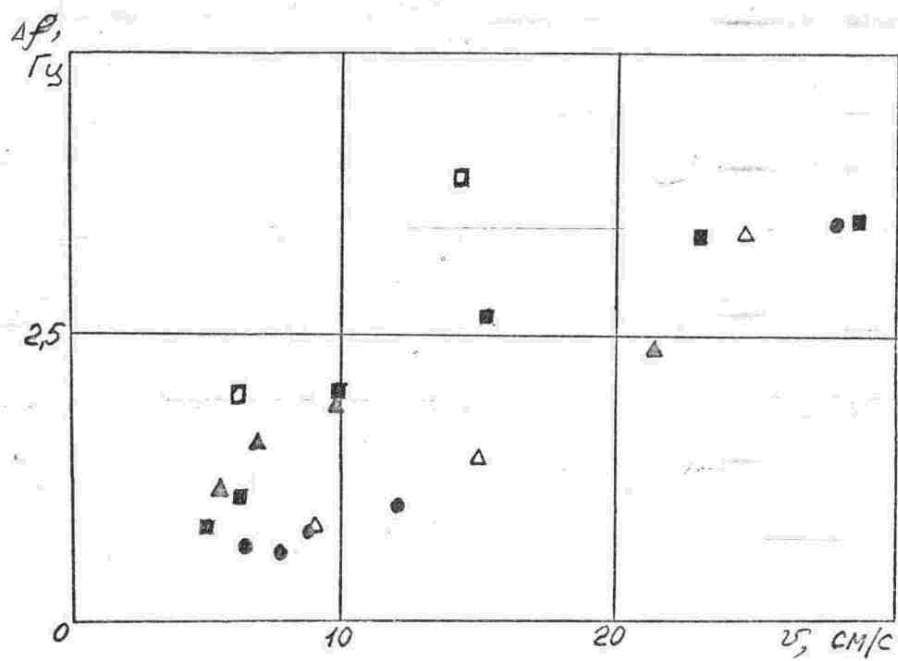
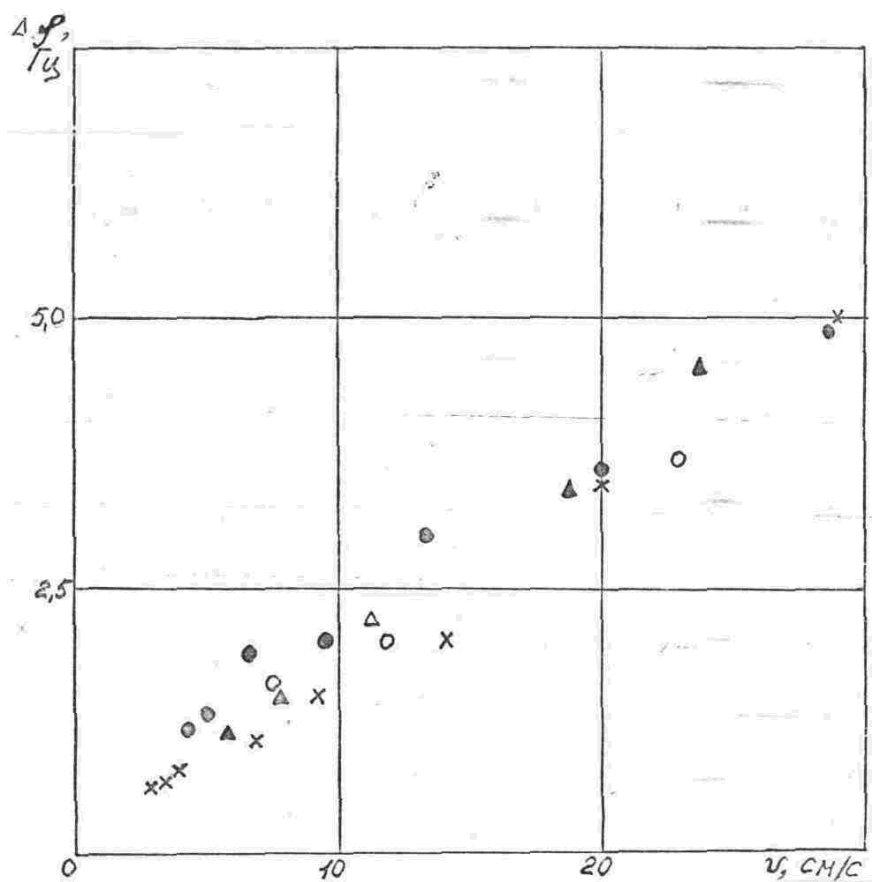


Рис.9. Зависимость ширины спектра импульса от скорости открывания дверей в помещении 1. Обозначения те же, что и на Рис. 7.



В другом случае, когда используются пороговые схемы обработки, предпочтителен способ, когда отношение сигнал/помеха определяется вероятностными методами: например, в заданной полосе частот определяются вероятностные характеристики помехи и определяются уровни, которые с заданной вероятностью не превышаются помехой. Эти уровни и сравниваются с амплитудой полезного импульса.

На Рис.11 для примера представлена временная развёртка и спектр атмосферных шумов в помещении № 3 во временном окне длительностью 5с. На Рис. 12 изображены усреднённые по 16 реализациям во временном окне 5 с спектры атмосферных шумов в исследуемых помещениях. Такая длительность временного окна выбрана исходя, во-первых, из наблюдаемой максимальной длительности импульса и, во-вторых, из нижней граничной частоты энергонесущей части спектра импульсов.

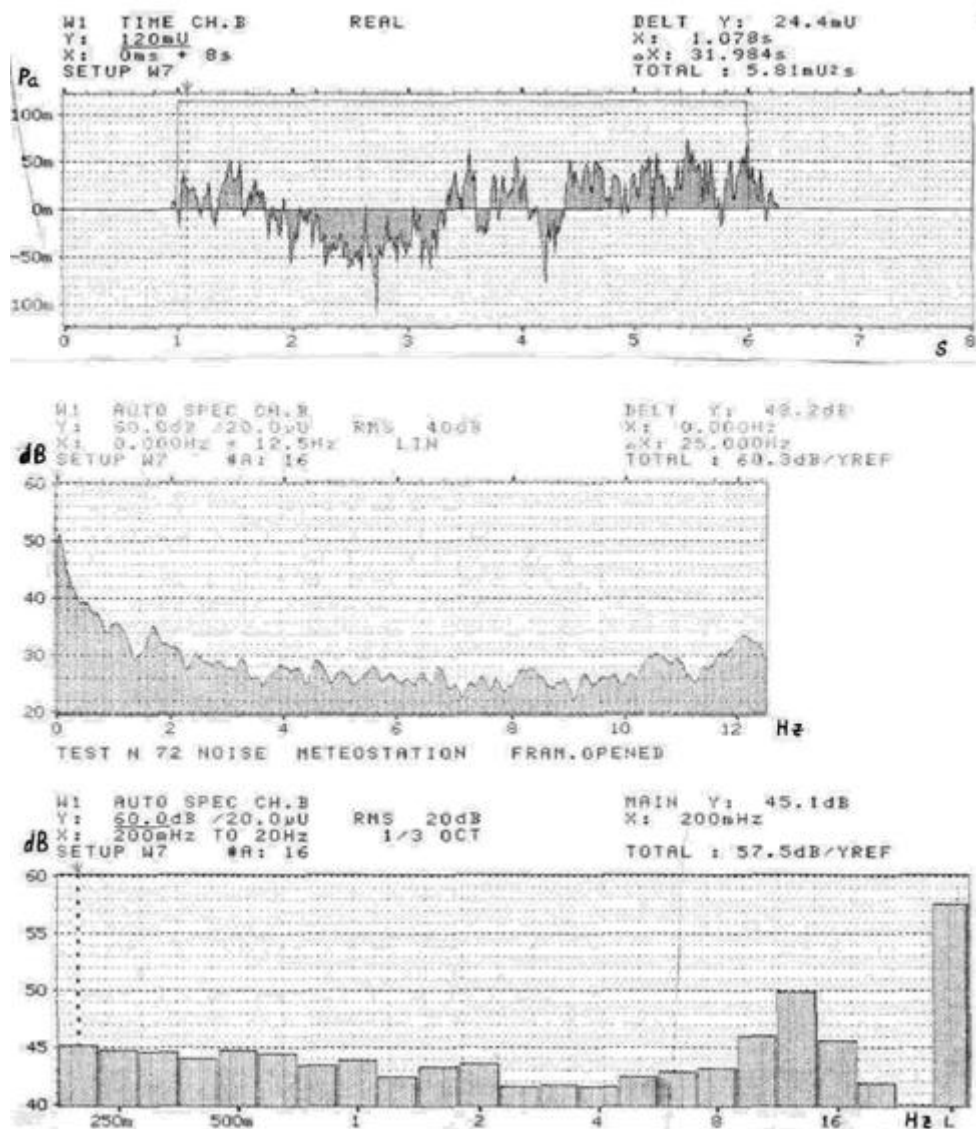


Рис. 11. Атмосферные шумы в помещении № 3 во временном окне длительностью 5 с.

При исследовании импульсных помех, проникающих внутрь помещения, обработка заключалась в определении отношения амплитуд P_B/P_H (коэффициентов прохождения – Рис.13) и спектров (Рис.14) импульсов внутри и снаружи помещения при разных степенях открытия окна, фрамуги и т.п. На Рис.13 h – ширина щели между окном и оконной рамой. На Рис.14 каждая кривая для наглядности сдвинута по шкале ординат на 10 дБ относительно предыдущей.

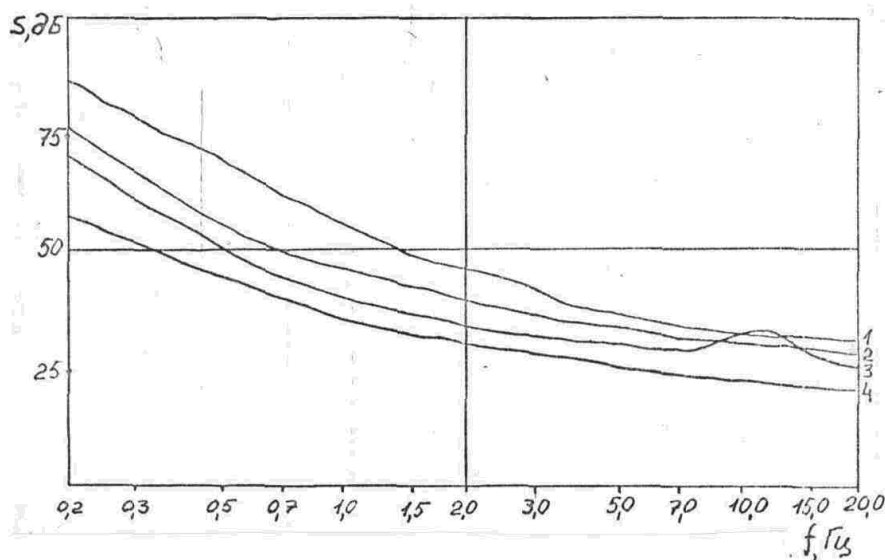


Рис. 12. Спектры атмосферных шумов, усреднённые по 16 реализациям во временном окне длительностью 5 с.

- 1 - помещение 1 при открытом окне, скорость ветра 10 – 15 м/с;
- 2 - помещения 1 и 2, окно закрыто;
- 3- помещение 3 при открытом окне, скорость ветра 2 – 5 м/с;
- 4 - помещения 3 и 4, окно закрыто.

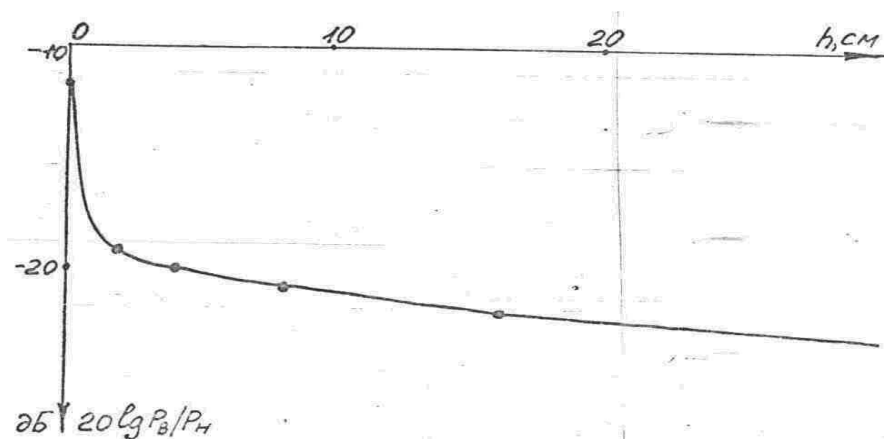


Рис.13. Зависимость коэффициента прохождения импульса $20 \lg(P_B/P_H)$ внутрь помещения от ширины щели h в окне.

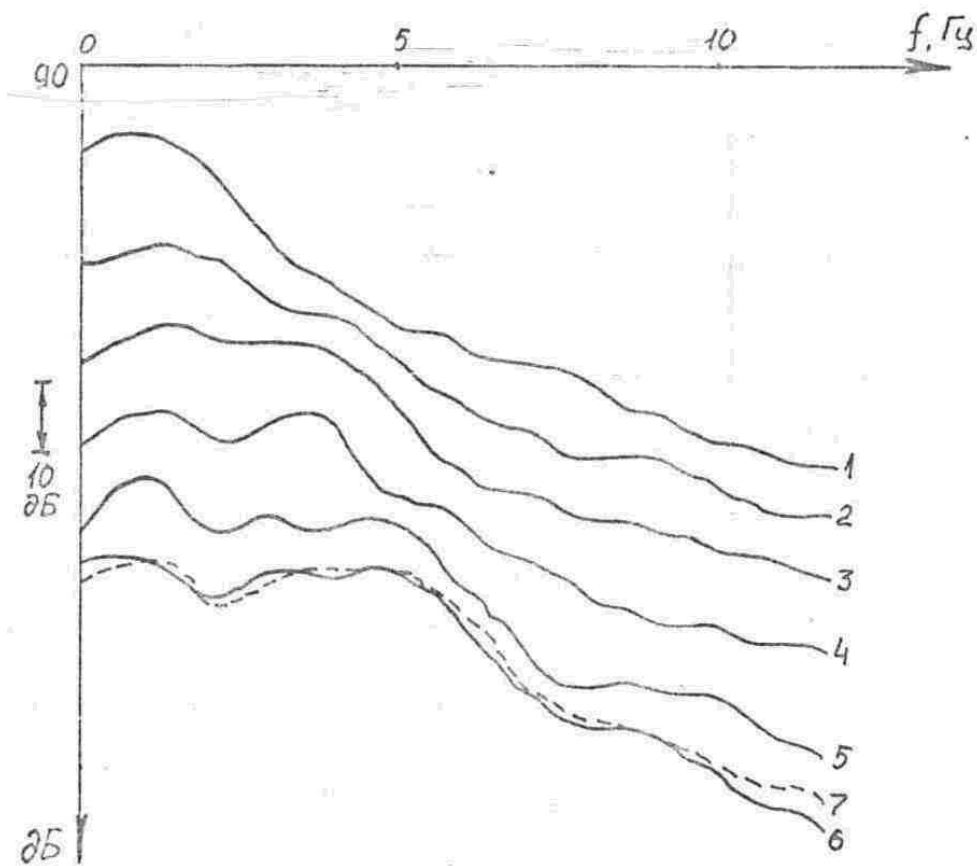


Рис. 14. Спектры импульсов, прошедших внутрь помещения, в зависимости от степени открытия окна;

h – ширина щели в окне:

1 – $h = 0$ (окно закрыто); 2 – $h = 2$ см; 3 – $h = 4$ см; 4 – $h = 8$ см;

5 – $h = 16$ см; 6 – $h = 32$ см; 7- окно открыто полностью.

4. Анализ полученных данных, определение зависимости характеристик инфразвукового сигнала от параметров помещений, скорости открывания дверей и окон и их размеров.

Анализ и обобщение полученных данных и теоретических расчётов позволил выявить следующие закономерности.

1. Наблюдается чёткая зависимость амплитуды инфразвукового импульса от скорости открывания двери (окна). При малых скоростях амплитуда быстро растёт с увеличением скорости открывания. Затем по мере увеличения скорости рост амплитуды начинает замедляться, приближаясь к своему предельному значению, равному максимальной амплитуде (см. [9]):

$$P_{max} = -0,5 \cdot \gamma \cdot P_0 \cdot S \cdot d / V, \quad (4.1)$$

где P_0 – атмосферное давление; V - объём помещения; S и d - площадь двери и её толщина соответственно; γ - отношение удельных теплоёмкостей, равное для воздуха примерно 1,4. Эта формула выражает амплитуду давления в герметически замкнутом помещении при движении двери, как поршня, до её выхода из дверной коробки и может быть рекомендована для оценки предельных значений амплитуд по заданным размерам помещения и двери (окна).

2. Амплитуда звукового давления в импульсе при одной и той же скорости открывания двери увеличивается с ростом относительного изменения объёма $\varepsilon = \delta V / V_0$, где δV – изменение объёма воздуха при смещении края двери в дверной коробке или края окна в раме на расстояние, равное толщине двери (окна) d .

3. При одной и той же скорости открывания двери (окна) и при прочих равных условиях амплитуда импульса резко падает с увеличением площади утечки (щелей, вытяжек, окон, форточек, вентиляционных отверстий и т.п.). Достижение предельного значения амплитуды (насыщение) происходит тем медленнее, чем больше площадь утечки.

4. Спектры импульсных сигналов также зависят от скорости открывания двери и объёма помещения: максимальные значения спектральных уровней растут с возрастанием скорости открывания и увеличением относительного изменения объёма ε . Ширина полосы спектра ΔF охватывающей основную энергонесущую часть сигнала, определяемая здесь частотой, на которой спектральный уровень упадет на 20 дБ от максимального значения, будет увеличиваться с возрастанием скорости открывания двери в среднем по линейному закону и не будет превышать 4-5 Гц для реальных скоростей открывания.

5. Если собственные частоты колебаний помещения как резонатора (при наличии открытых окон, форточек, вентиляционных отверстий) лежат в полосе спектра исходного импульса открывания двери, то они приводят к подъёму уровня спектральных составляющих на этих частотах. Особенно это проявляется в виде появления знакопеременных колебаний после окончания заднего фронта импульса, либо наложения таких колебаний на задний фронт. Такие подъёмы уровней на резонансных частотах заметны также на спектрах импульсов, прошедших в исследуемое помещение извне, для разных степеней открытия окна (Рис. 14).

6. Проведенные в п.2 и в работе [10] расчёты параметров инфразвукового процесса в помещении по разработанной акустической модели для реальных исследуемых помещений достаточно хорошо подтверждаются экспериментально, что говорит о пригодности и работоспособности модели. Количественные оценки влияния параметров помещений, скорости открывания дверей (окон) и их размеров, а также размеров вентиляционных отверстий и утечек

можно провести либо по формулам, либо по графикам, приведённым в п. 2 и в работе [10] и дополненным экспериментальными результатами.

7. Атмосферные помехи, измеренные внутри помещений, при отсутствии резонансов монотонно спадают с увеличением частоты в среднем на 10-12 дБ/окт на частотах 0,2 ÷ 0,5 Гц, на 7-8 дБ/окт на частотах 0,5 ÷ 2,0 Гц, на 3 - 4 дБ/окт на частотах 2,0 ÷ 20,0 Гц. С увеличением скорости ветра от 2 - 5 м/с до 10 - 12 м/с снаружи помещения уровень помехи в среднем возрастет примерно на 10 - 15 дБ. При открытом окне низкочастотная часть помехи (< 5 Гц) выше по уровню помехи в закрытом помещении на 10 - 15 дБ для частот 0,2 ÷ 0,5 Гц и на 5 - 10 дБ для частот 1÷3 Гц. Сильное повышение уровня помех на нижних частотах при открытом окне объясняется возрастанием турбулентности потоков воздуха в помещении.

Открытие окна, форточки и т.п. приводит к появлению резонанса на частоте, близкой к Гельмгольцевой частоте. Уровень частотной резонансной составляющей определяется добротностью помещения как резонатора и может быть довольно заметным на спектральных кривых атмосферных шумов (см. Рис.12, кривая 3: резонанс вблизи частоты 12 Гц, что совпадает со значением $f_{рез}$ в помещении № 3 кубатурой $\approx 16 \text{ м}^3$ с открытой форточкой размерами 0,35 x 0,35 м²).

В помещении 1 подъём спектра вблизи резонанса (~ 2 Гц) слабо выражен вследствие низкой добротности помещения.

8. При проникновении через закрытую дверь внутрь замкнутого помещения импульсной искусственно задаваемой помехи её амплитуда падает не менее, чем на 10 дБ (при полностью закрытой двери со щелью не шире 2 мм). Это совпадает со значением коэффициента прохождения атмосферных наружных шумов внутрь помещения через закрытое окно (на частотах ниже 5 Гц). Наличие вытяжки или открытого окна резко уменьшает коэффициент прохождения (до 24 дБ при полностью открытом окне). Кроме того, в спектрах импульсов, прошедших через закрытую дверь внутрь помещения с открытым окном, наблюдаются подъёмы спектральных уровней вблизи частот резонанса Гельмгольца для данного помещения с отверстием (окном). На Рис. 14 можно проследить "сползание" подъёмов в спектре в сторону более высоких частот по мере увеличения раскрытия окна.

Выводы и рекомендации.

1. Проведен информационный поиск по инфразвуковым процессам в помещениях.

Отмечено, что инфразвуковые процессы в помещениях возникают либо вследствие наличия источника в самом помещении (при открывании дверей, окон и т.п.), либо вследствие проникновения внутрь инфразвуковых и низкочастотных колебаний от внешних источников (атмосферные и промышленные шумы, шумы обтекания зданий, звуковые хлопки от пролетающих сверхзвуковых самолетов и т.д.), на которые замкнутое помещение может “отзываться”, главным образом, как резонатор двух типов: объёмный резонатор Гельмгольца (при наличии в помещении отверстия наружу) и линейный резонатор (при совпадении половины длины волны колебаний каким-либо из линейных размеров помещения).

2. Проработана рабочая гипотеза и построена акустическая модель инфразвукового процесса в помещении, возникающего при открывании дверей, окон и т.п. Проведены расчеты параметров процесса для заданных характеристик помещения, скоростей открывания дверей и их размеров, подтвержденные результатами экспериментов.

3. Проведены экспериментальные исследования инфразвуковых сигналов при открывании дверей и окон в закрытых помещениях четырех основных типоразмеров: площадь более 100 м^2 , высота (2,5 - 4) м ($116,7 \text{ м}^2 \times 3,77 \text{ м}$); площадь (15 - 30) м^2 , высота (2,5 - 4) м ($22,5 \text{ м}^2 \times 2,8 \text{ м}$); площадь (4 - 8) м^2 , высота (2,5 - 3) м ($5,9 \text{ м}^2 \times 2,7 \text{ м}$); менее 4 м^2 , высота (2 - 3) м ($3,45 \text{ м}^2 \times 2,7 \text{ м}$).

Амплитуда инфразвукового импульса зависит от скорости открывания двери, объема помещения и характеристик двери, наличия утечек (щелей в дверных и оконных проёмах, вентиляционных отверстий, открытых окон, форточек и т.п.). С увеличением скорости открывания двери и степени сжатия помещения (т.е. отношение объема вытесняемого дверью воздуха до выхода её из дверной коробки к объёму помещения) амплитуда инфразвукового импульса увеличивается. При прочих равных условиях амплитуда резко уменьшается при увеличении площади утечки: эта зависимость является наиболее сильной, что необходимо принимать во внимание при определении помехоустойчивости прибора – извещателя.

4. Спектральные характеристики импульсных сигналов также зависят от скорости открывания двери и параметров помещения: максимальные значения спектральных уровней и ширина основной энергонесущей части спектра (в целом не превышающей 5 Гц) увеличиваются с возрастанием скорости открывания двери и степени сжатия и уменьшаются при увеличении площади утечек. Введение утечки может привести к подъёму участка спектра в области частот, близких к резонансным частотам помещения.

5. Исследованы временные и спектральные характеристики акустических помех (атмосферные шумы, помехи, создаваемые искусственным путем в других помещениях и за окном). Исследовано прохождение этих помех внутрь исследуемого помещения через закрытую дверь или окно при разных степенях открытия окна, форточки и т.п.

Спектральные уровни атмосферных шумов в закрытом помещении монотонно снижаются с увеличением частоты: на низких частотах (ниже 0,5 Гц) $10 \div 12$ дБ/окт; от 0,5 до 2 Гц – $7 \div 8$ дБ/окт; выше 2 Гц -- $3 \div 4$ дБ/окт.

С увеличением скорости ветра от $2 \div 5$ м/с до $10 \div 15$ м/с спектральные уровни поднимаются на 10 - 12 дБ.

6. Коэффициент прохождения помехи (определяемый как отношение амплитуды сигнала внутри исследуемого помещения к амплитуде сигнала вне помещения) через закрытую дверь зависит от площади утечки и изменяется от - 10 дБ при закрытом окне до -24 дБ – при полностью открытом.

При наличии отверстия (открытые окна, форточки, вентиляция), а также в помещении больших размеров могут возникать резонансные явления, заключающиеся в подъеме спектральных уровней помех (искусственного и естественного происхождения) в области частот Гельмгольцевского (объемного) или геометрического (линейного) резонанса. Величина подъема спектральных составляющих зависит от добротности помещения, определяемого степенью и характером загруженности помещения, а также поглощением стенками, мебелью и иными предметами.

7. При определении помехоустойчивости прибора – извещателя следует в дальнейшем исходить из принципа и способа обработки полезного сигнала. В частности, если будут применяться пороговые схемы обнаружения, то помеху рекомендуется исследовать вероятностными методами с целью определения вероятности превышения помехой заданного порога в диапазоне рабочих частот извещателя.

Литература.

1. Рекламный материал на инфразвуковой извещатель "Друтектор" фирмы "Секал", ФРГ (патент ФРГ № 3534288А1, 1987 г.).
2. М.А.Исакович. "Инфразвук". Обзор литературы за период 1968 - 77 г.г. Изд. ЦНИИ «Румб», Ленинград, 1978 г.
3. Pimonov L. "Les infra-sons". – Paris, CNRS, 1976.
4. Gavreau V. "Infrasound". – Sci Journ., 1968, 4.
5. Bruel V., Olsen P. "Infrasonic Measurements". – Techn. Rev., N3, 1973.
6. О.И. Клименкова, С.А. Солдаткина. "Изучение инфразвука, создаваемого в городской среде." Сб. 9-я всесоюзная акуст.конференция. Секция И, 1977 г.
7. С.И. Цейтлин. "Измерение инфранизкочастотных колебаний". Сб. Виброметрия, М., 1973 г.
8. Сборник работ по звуковому удару. М, ЦАГИ, 1973 (Труды ЦАГ, Вып.1989).
9. О.В.Кудрявцев. "Исследование акустических сигналов, возникающих в закрытых помещениях при открывании двери". – Отчет АКИН, М., 1988 г.

10. О.В.Кудрявцев, М.Ф.Лебедев, Б.И.Фёдоров. “Исследование акустических процессов в помещениях при открывании окон, дверей и воздействии внешних помех”. – Отчет АКИН, М., 1989 г.