

Акустический расчет системы вентиляции и кондиционирования в современных зданиях

*Д.т.н., профессор И.И. Боголепов**

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет и ГОУ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;

магистр А.А. Гладких,

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Система вентиляции и кондиционирования воздуха (СВКВ) – важнейшая система для современных зданий и сооружений. Однако, кроме необходимого качественного воздуха, система транспортирует в помещения шум. Он идет от вентилятора и других источников, распространяется по воздуховоду и излучается в вентилируемое помещение. Шум несовместим с нормальным сном, учебным процессом, творческой работой, высокопроизводительным трудом, полноценным отдыхом, лечением, получением качественной информации [1]. В строительных нормах и правилах России сложилась такая ситуация. Метод акустического расчета СВКВ зданий, использовавшийся в старом СНиПе II-12-77 «Защита от шума» [13], устарел и не вошел поэтому в новый СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» [14]. И так, старый метод устарел, а нового общепризнанного пока нет [11,12]. Ниже предлагается простой приближенный способ акустического расчета СВКВ в современных зданиях, разработанный с использованием лучшего производственного опыта, в частности, на морских судах [4,5,7].

Предлагаемый акустический расчет основан на теории длинных линий распространения звука в акустически узкой трубе [2,3,10] и на теории звука помещений с практически диффузным звуковым полем [6]. Он выполняется с целью оценки уровней звукового давления (далее – УЗД) и соответствия их значений действующим нормам допустимого шума [14]. Он предусматривает определение УЗД от СВКВ вследствие работы вентилятора (далее – «машина») для следующих типовых групп помещений:

- 1) в помещении, где расположена машина;
- 2) в помещениях, через которые воздуховоды проходят транзитом;
- 3) в помещениях, обслуживаемых системой.

Исходные данные и требования

Расчет, проектирование и контроль защиты людей от шума предлагается выполнять для наиболее важных для человеческого восприятия октавных полос частот, а именно: 125 Гц, 500 Гц и 2000 Гц. Октавная полоса частот 500 Гц является среднегеометрической величиной в диапазоне нормируемых по шуму октавных полос частот 31,5 Гц – 8000 Гц [14]. Для постоянного шума расчет предусматривает определение УЗД в октавных полосах частот по уровням звуковой мощности (УЗМ) в системе. Величины УЗД и УЗМ связаны общим соотношением $L = L_w - 10 \lg S$, где L – УЗД относительно порогового значения $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м²; L_w – УЗМ относительно порогового значения 10^{-12} Вт; S – площадь распространения фронта звуковых волн, м².

УЗД должны определяться в расчетных точках нормируемых по шуму помещений по формуле $L = L_w + \Delta L_{II}$, где L_w – УЗМ источника шума. Величина ΔL_{II} , учитывающая влияние помещения на шум в нем, рассчитывается по формуле:

$$\Delta L_{II} = 10 \lg \left(\frac{\chi \Phi}{\Omega r^2} + \frac{4}{\kappa Q} \right),$$

где χ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего поля; Ω – пространственный угол излучения источника шума, рад.; Φ – коэффициент направленности излучения, принимается по экспериментальным данным (в первом приближении равен единице); r – расстояние от центра излучателя шума до расчетной точки в м; $Q = \frac{\alpha_{II} S_{II}}{1 - \alpha_{II}}$ – акустическая постоянная помещения, м²; α_{II} – средний коэффициент

звукопоглощения внутренних поверхностей помещения; S_{II} – суммарная площадь этих поверхностей, м²; κ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузного звукового поля в помещении.

Указанные величины, расчетные точки и нормы допустимого шума регламентируются для помещений различных зданий СНиПом 23-03-2003 «Защита от шума» [14]. Если расчетные значения УЗД превосходят норму допустимого шума хотя бы в одной из указанных трех полос частот, то необходимо спроектировать мероприятия и средства снижения шума.

Исходными данными для акустического расчета и проектирования СВКВ являются:

- компоновочные схемы, применяемые в конструкции сооружения; размеры машин, воздухопроводов, регулирующей арматуры, колен, тройников и воздухораспределителей;
- скорости движения воздуха в магистралях и ответвлениях — по данным технического задания и аэродинамического расчета;
- чертежи общего расположения помещений, обслуживаемых СВКВ — по данным строительного проекта сооружения;
- шумовые характеристики машин, регулирующей арматуры и воздухораспределителей СВКВ — по данным технической документации на эти изделия.

Шумовыми характеристиками машины являются следующие уровни УЗМ воздушного шума в октавных полосах частот в дБ: L_{WB} - УЗМ шума, распространяющегося от машины в воздухопровод всасывания; L_{WH} - УЗМ шума, распространяющегося от машины в воздухопровод нагнетания; L_{WM} - УЗМ шума, излучаемого корпусом машины в окружающее пространство. Все шумовые характеристики машины определяются в настоящее время на основании акустических измерений по соответствующим национальным или международным стандартам и другим нормативным документам [10].

Шумовые характеристики глушителей, воздухопроводов, регулируемой арматуры и воздухораспределителей представлены УЗМ воздушного шума в октавных полосах частот в дБ:

ΔL_W - УЗМ шума, генерируемого элементами системы при прохождении потока воздуха через них (генерация шума); δL_W — УЗМ шума, рассеиваемого или поглощаемого в элементах системы при прохождении через них потока звуковой энергии (снижение шума).

Эффективность генерации и снижения шума элементами СВКВ определяются на основании акустических измерений. Подчеркнем, что значения величин ΔL_W и δL_W должны быть указаны в соответствующей технической документации.

Должное внимание уделяется при этом точности и надежности акустического расчета, которые закладываются в погрешность результата величинами $t_\phi \sigma$ и ε [6,10,12,15].

Расчет для помещений, где установлена машина

Пусть в помещении 1, где установлена машина, имеется вентилятор, уровень звуковой мощности которого, излучаемый в трубопровод всасывания, нагнетания и через корпус машины, есть величины в дБ L_{WB1} , L_{WH1} и L_{WM1} . Пусть у вентилятора на стороне трубопровода нагнетания установлен глушитель шума с

эффективностью глушения в дБ $(\delta_0 L_W)_1$. Рабочее место находится на расстоянии r_1 от машины. Разделяющее помещение 1 и помещение 2 стена находится на расстоянии r_{11} от машины. Постоянная звукопоглощения помещения 1: $Q_1 = \frac{\alpha_1 S_1}{(1 - \alpha_1)}$.

Для помещения 1 расчет предусматривает решение трех задач.

1-я задача. Выполнение нормы допустимого шума L_{H1} .

Если всасывающий и нагнетательный патрубки выведены из помещения машины, то расчет УЗД в помещении, где она расположена, производится по следующим формулам.

Октавные УЗД в расчетной точке помещения L_1 определяются в дБ по формуле:

$$L_1 = L_{WM1} + t_\phi \sigma + \Delta L_{П1} \leq L_{H1}, \text{ дБ}$$

где L_{WM1} — УЗМ шума, излучаемого корпусом машины с учетом точности и надежности с помощью $t_\phi \sigma$ [6,10,12]. Величина ΔL_{II} , указанная выше, определяется по формуле:

$$\Delta L_{II} = 10 \lg \left(\frac{\chi_1}{2\pi r_1^2} + \frac{4}{\kappa_1 Q_1} \right)$$

Если в помещении размещены n источников шума, УЗД от каждого из которых в расчетной точке равны L_i , то суммарный УЗД от всех их определяется по формуле:

$$L_\Sigma = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \right] \leq L_{H1}, \text{ дБ.}$$

В результате акустического расчета и проектирования СВКВ для помещения 1, где установлена машина, должно быть обеспечено выполнение в расчетных точках норм допустимого шума L_{H1} [14].

2-я задача. Расчет величины УЗМ в воздуховоде нагнетания из помещения 1 в помещение 2 (помещение, через который воздуховод проходит транзитом), а именно величины L_{WH2} в дБ производится по формуле

$$L_{WH2} = L_{WH1} - (\delta_0 L_W)_1.$$

3-я задача. Расчет величины УЗМ, излучаемой стенкой площадью $S_{1,2}$ со звукоизоляцией $R_{1,2}$ помещения 1 в помещение 2, а именно величины L_{WS12} в дБ, выполняется по формуле

$$L_{WS12} = L_{WM1} + 10 \lg \left(\frac{\chi_1}{2\pi r_{11}^2} + \frac{1}{\kappa_1 Q_1} \right) - R_{1,2} + 10 \lg S_{1,2}$$

Таким образом, результатом расчета в помещении 1 является выполнение норм по шуму в этом помещении и получение исходных данных для расчета в помещении 2.

Расчет для помещений, через которые воздуховод проходит транзитом

Для помещения 2 (для помещений, через которые воздуховод проходит транзитом) расчет предусматривает решение следующих пяти задач.

1-я задача. Расчет звуковой мощности, излучаемой стенками воздуховода в помещение 2, а именно определение величины L_{WT} в дБ по формуле:

$$L_{WT} = L_{WH2} - 10 \lg D_\odot^2 - R_T + 10 \lg(4 l_2 D_\odot)$$

В этой формуле: L_{WH2} — см. выше 2-ю задачу для помещения 1;

$D_\odot = 1,12 \sqrt{S_0}$ — эквивалентный диаметр сечения воздуховода с площадью поперечного сечения S_0 ;

l_2 — длина помещения 2.

Звукоизоляция стенок цилиндрического воздуховода в дБ рассчитывается по формуле:

$$R_T = 10 \lg E - 20 \lg \left(\frac{D}{s} \right) - 16 \lg f + 32 ,$$

где E — динамический модуль упругости материала стенки воздуховода, Н/м²;

D — внутренний диаметр воздуховода в м;

s — толщина стенки воздуховода в м;

f — среднегеометрическая частота октавных полос в Гц.

Звукоизоляция стенок воздуховодов прямоугольного сечения рассчитывается по следующей формуле в дБ:

$$R_r = 14,5 [lg(mf + 100) - 2],$$

где $m = \rho s$ — масса единицы поверхности стенки воздуховода (произведение плотности материала ρ в кг/м³ на толщину стенки s в м);

f — среднегеометрическая частота октавных полос в Гц.

2-я задача. Расчет УЗД в расчетной точке помещения 2, находящейся на расстоянии r_2 от первого источника шума (воздуховод) выполняется по формуле, дБ:

$$L_{21} = L_{WT} + 10lg\left(\frac{\chi_2}{\pi r_2^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2}\right)$$

3-я задача. Расчет УЗД в расчетной точке помещения 2 от второго источника шума (УЗМ, излучаемой стеной помещения 1 в помещение 2, – величина L_{WS12} в дБ) выполняется по формуле, дБ:

$$L_{22} = L_{WS12} + 10lg\frac{4}{\kappa_2 Q_2}$$

4-я задача. Выполнение нормы допустимого шума L_{H2} .

Расчет ведется по формуле в дБ:

$$L_2 = \{10lg(10^{0,1L_{21}} + 10^{0,1L_{22}}) + \varepsilon\} \leq L_{H2}.$$

В результате акустического расчета и проектирования СВКВ для помещения 2, через которое воздуховод проходит транзитом, должно быть обеспечено выполнение в расчетных точках норм допустимого шума L_{H2} [14]. Это первый результат.

5-я задача. Расчет величины УЗМ в воздуховоде нагнетания из помещения 2 в помещение 3 (помещение, обслуживаемое системой), а именно величины L_{WH3} в дБ по формуле:

$$L_{WH3} = L_{WH2} - (\delta_1 L_W)_2.$$

Величина потерь на излучение звуковой мощности шума стенками воздуховодов на прямолинейных участках воздуховодов единичной длины $\delta_1 L_W$ в дБ/м представлена в таблице 2. Вторым результатом расчета в помещении 2 является получение исходных данных для акустического расчета системы вентиляции в помещении 3.

Расчет для помещений, обслуживаемых системой

В помещениях 3, обслуживаемых СВКВ (для которых система в конечном счете и предназначена), расчетные точки и нормы допустимого шума принимаются в соответствии со СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» [14] и техническим заданием.

Для помещения 3 расчет предусматривает решение двух задач.

1-я задача. Расчет звуковой мощности, излучаемой воздуховодом через выпускное воздуховодораспределительное отверстие в помещение 3, а именно определение величины L_{W3} в дБ, предлагается выполнять следующим образом.

Частная задача 1 для низкоскоростной системы со скоростью воздуха $v \ll 10$ м/с и $K_0=0$ и трех типовых помещений (см. ниже пример акустического расчета) решается с помощью формулы в дБ:

$$L_{W3} = L_{WH3} - (\delta_0 L_W)_2 - (\delta_2 L_W)_i - \Delta L_0$$

Здесь $L_{WH3} = L_{WH2} - (\delta_1 L_W)_2$;

$L_{WH2} = L_{WH1} - (\delta_0 L_W)_1$;

$(\delta_0 L_W)_2$ - потери в глушителе шума в помещении 3;

$(\delta_2 L_W)_{i=1}^{j=2}$ - потери в тройнике в помещении 3 (см. ниже формулу);

ΔL_0 – потери в результате отражения от конца воздуховода (см. таблицу 1 [13]).

Общая задача 1 состоит в решении для многих из трех типовых помещений с помощью следующей формулы в дБ:

$$L_{W3} = [\text{генерация шума}] - [\text{снижение шума}] = [10 \lg(10^{0,1 L_{WH1}} + 10^{0,1 \Sigma \Delta L_{Wi}}) + K_0] - [\Delta L_0 + \Sigma \delta L_W]$$

Здесь L_{WH1} — УЗМ шума, распространяющегося от машины в воздуховод нагнетания в дБ с учетом точности и надежности величиной $t_\phi \sigma$ (принимается по данным технической документации на машины);

$$\Sigma \Delta L_W = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1 \Delta L_{Wi}} \right) \text{ — УЗМ шума, генерируемого воздушным потоком во всех элементах}$$

системы в дБ (принимается по данным технической документации на эти элементы);

$\Sigma \delta L_W$ — УЗМ шума, поглощающегося и рассеивающегося при прохождении потока звуковой энергии через все элементы системы в дБ (принимается по данным технической документации на эти элементы);

ΔL_0 — величина, учитывающая отражение звуковой энергии от концевое выходного отверстия воздуховода в дБ, принимается по таблице 1 (эта величина равна нулю, если $\Sigma \delta L_W$ уже включает в себя ΔL_0);

K_0 — величина, равная 5 дБ для низкоскоростной СВКВ (скорость воздуха в магистралях меньше 15 м/с), равная 10 дБ для среднескоростной СВКВ (скорость воздуха в магистралях меньше 20 м/с) и равная 15 дБ для высокоскоростной СВКВ (скорость в магистралях меньше 25 м/с).

Таблица 1. Величина ΔL_0 в дБ. Октавные полосы f

| Корень квадратный из площади поперечного выходного сечения воздуховода, мм | 125 Гц | 500 Гц | 2000 Гц |
|--|--------|--------|---------|
| 50 | 23,0 | 11,5 | 3,0 |
| 100 | 18,0 | 7,5 | 0,5 |
| 125 | 16,5 | 6,5 | 0,5 |
| 140 | 15,0 | 5,5 | 0 |
| 160 | 14,5 | 4,5 | 0 |
| 180 | 13,5 | 4,0 | 0 |
| 200 | 13,0 | 3,0 | 0 |
| 225 | 11,5 | 2,5 | 0 |
| 250 | 11,0 | 2,0 | 0 |
| 280 | 10,5 | 1,5 | 0 |
| 315 | 9,5 | 1,0 | 0 |
| 355 | 8,5 | 1,0 | 0 |
| 400 | 7,5 | 0,5 | 0 |
| 450 | 6,5 | 0,5 | 0 |
| 500 | 6,0 | 0,5 | 0 |
| 800 | 3,0 | 0 | 0 |
| 1600 | 0 | 0 | 0 |

При расчете и проектировании средств снижения шума главным объектом внимания инженера-акустика является УЗМ шума, поглощающегося и рассеивающегося при прохождении потока звуковой энергии через все элементы СВКВ, а именно величина $\Sigma \delta L_W$.

Оптимизация 1-й задачи для помещения 3.

Вариант А: расстояние между элементами, поглощающими и рассеивающими шум в СВКВ, достаточно большое по сравнению с длиной волны (хорошее акустическое проектирование). Тогда в соответствии с главным принципом получения максимального эффекта снижения шума в СВКВ при расчете суммарного поглощения и рассеивания в СВКВ следует пользоваться следующей формулой суммирования в дБ:

$$\Sigma \delta L_W = \sum_i^g (\delta_0 L_W)_i + \sum_{i=1}^m (\delta_1 L_W)_i l_i + \sum_{i=1}^k (\delta_2 L_W)_i^j + \sum_{i=1}^l (\delta_3 L_W)_i ,$$

где $\sum_i^g (\delta_0 L_W)_i$ — потери звуковой мощности в глушителях шума (активного, камерного или смешанного типа) в дБ, принимаемые по данным технической документации;

$\sum_{i=1}^m (\delta_1 L_W)_i l_i$ — суммарные потери звуковой мощности на прямолинейных участках воздуховодов;

l_i — длина i -го участка в м;

m — общее число таких участков;

$(\delta_1 L_W)_i$ — потери звуковой мощности на i -м прямолинейном участке воздуховода единичной длины в дБ/м, принимается по данным таблицы 2 [13];

$\sum_{i=1}^k (\delta_2 L_W)_i^j$ — суммарные потери звуковой мощности в местах i -го тройника системы, общее число

которых k , с ответвлением j ;

величина $(\delta_2 L_W)_i^j$ в дБ принимается по формуле (см. ниже) или по данным технической документации;

$\sum_{i=1}^l (\delta_3 L_W)_i$ — потери звуковой мощности в регулируемой арматуре и в воздухораспределителях,

принимается в дБ по данным соответствующей технической документации на эти устройства (если эта величина включает в себя потери звуковой мощности в конечном воздухораспределителе, то $\Delta L_0 = 0$).

Таблица 2. Величина потерь звуковой мощности шума на прямолинейных участках воздуховодов единичной длины $\delta_1 L_W$ в дБ/м. Октавные полосы f

| Форма поперечного сечения воздуховода | Диаметр или эквивалентный диаметр воздуховода, мм | 125 Гц | 500 Гц | 2000 Гц |
|---------------------------------------|---|--------|--------|---------|
| Прямоугольная | 75 — 175 | 0,64 | 0,32 | 0,32 |
| Прямоугольная | 200 -375 | 0,64 | 0,32 | 0,23 |
| Прямоугольная | 400 — 750 | 0,64 | 0,16 | 0,16 |
| Прямоугольная | 800 — 1500 | 0,32 | 0,10 | 0,07 |
| Круглая | 75 — 175 | 0,10 | 0,16 | 0,31 |
| Круглая | 200 — 375 | 0,10 | 0,16 | 0,22 |
| Круглая | 400 — 750 | 0,06 | 0,10 | 0,16 |
| Круглая | 800 — 1500 | 0,03 | 0,06 | 0,07 |

Потери звуковой мощности в местах разветвления системы (в тройниках) определяется тем, что исходная мощность делится в соответствии с относительной площадью разветвлений. Если воздуховод перед тройником i с площадью сечения S разделяется на два воздуховода с площадью сечений $S_{j=1}$ и $S_{j=2}$, то потери звуковой мощности в сечении $S_{j=1}$ рассчитываются по формуле:

$$(\delta_3 L_W)_i^{j=1} = 10 \lg \left[\frac{\left(1 + \frac{S_1}{S} + \frac{S_2}{S} \right)^2}{4 \frac{S_1}{S}} \right]$$

Если $\left(\frac{S_1 + S_2}{S} \right) = 1$, к чему следует стремиться из аэродинамических соображений, то представленная

формула принимает вид: $(\delta_3 L_W)_i^{j=1} = 10 \lg \left(\frac{S}{S_1} \right)$.

Вариант Б: расстояние между элементами, поглощающими и рассеивающими шум в СВКВ, мало по отношению к длине звуковой волны (плохое акустическое проектирование). При расчете рассеивания в элементах системы следует пользоваться формулой суммирования в Вт относительно порогового значения по формуле:

$$\Sigma \delta_i L_W = 10 \lg \left(10^{0,1 \sum (\delta_0 L_W)_i} + 10^{0,1 \sum (\delta_1 L_W)_i} + 10^{0,1 \sum (\delta_2 L_W)_i} + 10^{0,1 \sum (\delta_3 L_W)_i} \right).$$

Искусство проектирования СВКВ состоит именно в том, чтобы исключить плохое акустическое проектирование. Главную роль здесь играет личная производственная практика инженера-акустика и лучшие отечественные и международные прототипы СВКВ.

2-я задача. Выполнение нормы допустимого шума L_{H3} .

Октавные УЗД воздушного шума СВКВ в помещениях 3, обслуживаемых одним j -м воздухораспределителем, следует определять в расчетной точке по формуле в дБ:

$$L_{3j} = L_{W3} + \Delta L_{Пj},$$

где $\Delta L_{Пj} = 10 \lg \left(\frac{\chi_3 \Phi_3}{\Omega_3 r_j^2} + \frac{4}{\kappa_3 Q_3} \right)$ – величина в дБ, учитывающая влияние помещения на шум в

нем от СВКВ при расстоянии r_j в м от центра воздухораспределителя j до расчетной точки.

Окончательно имеем для помещения 3: УЗД воздушного шума в помещении, обслуживаемом СВКВ, от n воздухораспределителей, каждый из которых дает вклад в расчетную точку L_j в дБ с нормой допустимого шума L_H в дБ в этой точке, следует определять по формуле суммирования в Вт:

$$L_3 = \left\{ 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{0,1 L_i} \right] + \varepsilon \right\} \leq L_{H3}, \text{ дБ.}$$

Точность и надежность расчета учитывается максимальной погрешностью результата — величиной ε [10,12,15], как указано ниже в примере акустического расчета вентиляции для местных телерадиостудий.

В результате акустического расчета СВКВ в помещениях, обслуживаемых системой, должно быть обеспечено путем *проектирования и контроля* выполнение в расчетных точках норм допустимого шума L_H , установленных для жилых, общественных и промышленных зданий СНиПом 23-03-2003 «Защита от шума».

Проектирование и контроль

Для проектирования и контроля снижения шума от работы СВКВ первостепенное значение имеют следующие мероприятия и средства:

- 1) компоновочные решения;
- 2) уменьшение скоростей движения воздуха в системе;
- 3) установка глушителей шума (активных, камерных и смешанного типа) в воздуховодах;
- 4) применение звукоизоляции и виброизоляции источников шума;
- 5) применение звукопоглощения в помещениях.

При разработке компоновочных решений необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Избегать обслуживания одной машиной нескольких ответственных по шуму помещений, расположенных на существенно различных расстояниях от вентилятора.
2. Предусмотреть при компоновке СВКВ места для звукоизолирующего помещения для машины, для установки глушителей и для виброизолирующих устройств.
3. Обеспечить воздухообмены в помещениях рациональной компоновкой СВКВ таким образом, чтобы избежать излишних запасов подачи воздуха.

Для снижения уровней шума СВКВ необходимо стремиться к уменьшению скоростей движения воздуха в системе до минимально возможных значений. При скоростях движения воздуха в магистралях системы до 15 м/с (в ответвлениях – до 6 м/с) генерация шума машинами незначительна и без особых трудностей может быть еще уменьшена в случае необходимости с помощью глушителей шума. Генерация же шума в самой системе воздуховодов, арматуре и воздухораспределителях, при указанных скоростях и коэффициенте местного сопротивления (безразмерная величина потерь напора) менее пяти, практически отсутствует.

Главным специальным средством снижения воздушного шума СВКВ являются глушители шума (активные, камерные и смешанного типа), которые должны применяться в соответствии с нормативными и методическими документами, научно-технической литературой и стандартами [6,7,8,9,10,13,14]. Располагать глушители шума рекомендуется в непосредственной близости к машинам и другим источникам генерации шума или перед выпускным отверстием воздуховода.

Машины рекомендуется обеспечивать необходимой звукоизоляцией и виброизоляцией в соответствии с нормативными и методическими документами, научно-технической литературой и стандартами [6,10]. Лучшим способом звукоизоляции машины является помещение её в специальное звукоизолирующее помещение (венткамеру) со звукопоглощающей облицовкой изнутри. Машины должны быть установлены на виброизоляторах (амортизаторах) для предотвращения распространения структурного звука на несущие конструкции и далее в другие помещения. Между машиной и воздуховодом следует применять гибкие вставки для предотвращения дополнительной передачи по ним структурного звука в вентилируемое помещение. В необходимых случаях воздуховоды рекомендуется крепить к несущим конструкциям через виброизолирующие подвесы. Для снижения шума от работы СВКВ в вентилируемом помещении полезно увеличивать звукопоглощающие свойства помещений. Уровень воздушного шума вокруг воздуховодов прямоугольного сечения, как правило, значительно выше, чем для аналогичных цилиндрических воздуховодов.

Большое практическое значение имеет контроль полученного результата путем измерения фактического уровня шума в расчетных точках. Фактические значения должны быть меньше значений норм допустимого шума. Отладка и доработка мероприятий и средств снижения шума СВКВ для получения необходимого эффекта снижения шума оптимальным способом (минимальные затраты средств, материалов и времени при наивысшем качестве) производится в соответствие с национальными и международными стандартами и нормативными документами. Аэродинамическое и акустическое регулирование построенных СВКВ следует производить совместно, добиваясь наименьших уровней шума при подаче заданного количества воздуха. Конечные результаты рекомендуется оформлять в виде графика расчетных, фактических и нормативных уровней шума СВКВ в заданных помещениях.

Пример акустического расчета вентиляции для местных радио и телестудий

С укреплением местного самоуправления радиовещательные и телевизионные студии появляются в огромной России в массовом порядке, приобретая принципиальное значение для развития гражданского общества и улучшения в связи с этим жизни людей. Одним из главных качеств таких студий является их хорошая акустика. Она складывается из необходимой звукоизоляции ограждающих конструкций и рекомендуемого времени реверберации пространства студии. То и другое нормируется СНиПом 23-03-2003 «Защита от шума» [14]. Должное внимание при этом следует уделять расчету снижения шума, создаваемого системой вентиляции, не вошедшему пока в указанный СНиП. Схема вентиляции типовой местной телерадиостудии представлена на рис. 1.

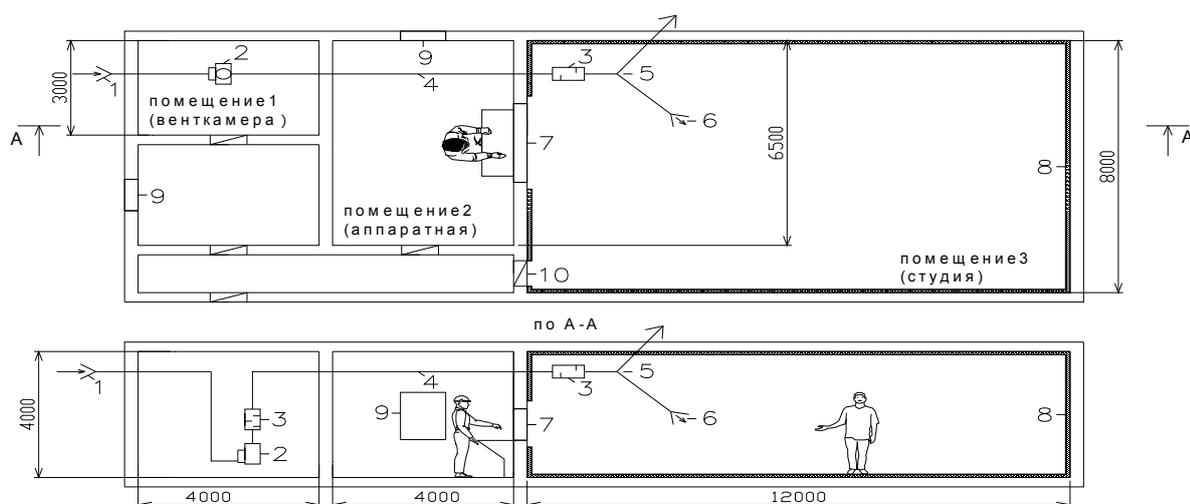


Рисунок 1. Схема вентиляции типовой местной телерадиостудии

1 – впускное отверстие; 2 – вентилятор; 3 – глушитель шума; 4 – воздуховод; 5 – тройник;
6 – выпускное отверстие; 7 – просмотровое окно режиссера [6]; 8 – звукопоглощающая облицовка;
9 – окно-стеклопакет; 10 – двойная дверь с вентиляционной решеткой [6]

Итак, выполним акустический расчет низкоскоростной системы вентиляции комплекса помещений типовой местной телерадиостудии, обеспечив в них выполнение норм допустимого шума. Для этого необходимо произвести расчет уровней звукового давления для трех помещений высотой 4 м со следующими размерами пола: 4х3 м (помещение 1, где установлена машина-вентилятор; $S_{\Pi} = 80 \text{ м}^2$, $V = 48 \text{ м}^3$), 4х6,5 м (помещение 2, через которые воздуховод проходят транзитом; $S_{\Pi} = 136 \text{ м}^2$, $V = 104 \text{ м}^3$) и 12х8 м (помещение 3, обслуживаемое системой; $S_{\Pi} = 352 \text{ м}^2$, $V = 384 \text{ м}^3$). По назначению: помещение 1 – венткамера, помещение 2 – аппаратная с естественной вентиляцией, помещение 3 – телерадиостудия с принудительной вентиляцией. Звукоизоляция помещений студии от внешних шумов обеспечена. Другие исходные данные даны ниже в ходе расчета. Первоначальные конструктивные данные принимаются исходя их технического задания на проектирование указанных помещений.

Решение представлено в следующих таблицах.

Таблица 3. Помещение 1, где установлена машина (венткамера). Октавные полосы f

| Составляющие акустического расчета | Наименование расчетной величины | Формула расчета (откуда берется значение) | 125 Гц | 500 Гц | 2000 Гц |
|--|--|--|---|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. Вентилятор типа 16/6,3 ЦСУ в центре камеры | УЗМ, излучаемый корпусом, $L_{WM}, \text{дБ}$ | Из технической документации на вентилятор | 56 | 62 | 56 |
| 2. Помещение венткамеры при $\chi = 1, \Omega = 2\pi, \Phi = 1$ Влияние помещения венткамеры на шум на рабочем месте при $r_1 = 2 \text{ м}$ $\Delta L_1, \text{дБ}$ | Коэффициент κ_1 | СНиП 23-03-2003. Табл.4 для α_{Π} (см. ниже) | 1.0 | 1,25 | 1,43 |
| | Средний коэффициент звукопоглощения α_{Π} | Из технической документации на помещение | 0.1 | 0,2 | 0,3 |
| | Постоянная звукопоглощения помещения, $Q_1, \text{м}^2$ $\Delta L_1, \text{дБ}$ | $Q_1, \text{м}^2$ $\Delta L_1, \text{дБ}$ | $Q_1 = \frac{\alpha_{\Pi} S_{\Pi}}{1 - \alpha_{\Pi}}$ $\Delta L_1 = 10 \lg \left(\frac{1}{2\pi r_1^2} + \frac{1}{\kappa_1 Q_1} \right)$ | 8,9 | 20.0 |
| 3. Результаты расчета для уровня шума на рабочем месте венткамеры при $r_1 = 2 \text{ м}$ и $t_{\phi} \sigma = 5 \text{ дБ}$ Норма шума в венткамере для постоянного рабочего места Превышение нормы | УЗД, в расчетной точке венткамеры $L_1, \text{дБ}$ $L_{H1}, \text{дБ}$ | $L_1 = L_{WM} + t_{\phi} \sigma + \Delta L_1$ СНиП 23-03-2003. Раздел 6 пункт 4 | 53 87 нет | 56 78 нет | 49 73 нет |
| 4. Вентилятор типа 16/6,3 ЦСУ, воздуховод Нагнетания | УЗМ, излучаемый в воздуховод нагнетания венткамеры, $L_{WH1}, \text{дБ}$ | Из технической документации на вентилятор | 87 | 74 | 67 |
| 5. Глушитель шума типа ГЦ, 5 калибров, ППУ40-08С в воздуховоде нагнетания венткамеры | Потери звуковой мощности в глушителе $(\delta_0 L_W)_1, \text{дБ}$ | Из технической документации на глушитель | 8 | 20 | 20 |
| 6. Цилиндрический воздуховод в венткамере | УЗМ, излучаемый воздуховодом в аппаратную, $L_{WH2}, \text{дБ}$ | $L_{WH2} = L_{WH1} - (\delta_0 L_W)_1, \text{дБ}$ | 79 | 54 | 47 |

Таблица 4. Помещение 2, через которое воздуховод проходит транзитом (аппаратная)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|--|---|---|------|------|
| 1. Цилиндрический воздуховод в аппаратной от стены до стены с диаметром и толщиной стенок: $D = 200 \text{ мм}, s = 1 \text{ мм}$ | а) УЗМ в начале воздуховода аппаратной $L_{WH2}, \text{дБ}$ | Из таблицы 1П, пункт 6. | 79 | 54 | 47 |
| | б) Звукоизоляция $R_B, \text{дБ}$ стенок воздуховода из стали с $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\frac{D}{s} = 200$ | $R_T = 10 \lg E - 20 \lg \left(\frac{D}{s} \right) - 16 \lg f + 32$ | 66 | 56 | 46 |
| 2. Помещение аппаратной при $\chi = 1, \Omega = \pi, \Phi = 1$ | а) Коэффициент κ_2 | СНиП 23-03-2003 Табл.4 для α_{II} (см. ниже) | 1,00 | 1,25 | 1,43 |
| | б) Средний коэффициент звукопоглощения α_{II} | Из техдокументации на помещение | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| | в) Постоянная звукопоглощения аппаратной, $Q_2, \text{м}^2$ | $Q_2 = \frac{\alpha_{II} S_{II}}{1 - \alpha_{II}}$ | 15,1 | 34,0 | 58,3 |
| | г) Влияние помещения аппаратной на шум на рабочем месте при $r_2 = 3 \text{ м}$ | $\Delta L_2, \text{дБ}$ | $\Delta L_2 = 10 \lg \left(\frac{1}{\pi r_2^2} + \frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right)$ | -5 | -9 |
| 3. УЗД от трубы воздуховода на рабочем месте в аппаратной при $l = 4 \text{ м}$ и $t_\phi \sigma = 5 \text{ дБ}$ $10 \lg \frac{4l}{D} = 19 \text{ дБ}$ | $L_T, \text{дБ}$ | $L_T = L_{WH2} + t_\phi \sigma - R_T + \Delta L_2 + 10 \lg \frac{4l}{D}$ | 32 | 13 | 14 |
| 4. Результаты расчета уровня шума в аппаратной от шума стены помещения радио и телестудии при $S_{CT} = 4 \times 6,5 = 26 \text{ м}^2$ | а) Максимальная звуковая мощность источника в помещении радио и телестудии | Из техзадания | 100 | 100 | 100 |
| | б) Влияние помещения на шум на рабочем месте при (Q_ϕ - см. таблицу 3 П.) | $\Delta L_3 = 10 \lg \left(\frac{1}{2\pi r_3^2} + \frac{1}{\kappa_3 Q_\phi} \right)$ | -13 | -14 | -13 |

| | | | | | |
|---|--|---|------|------|------|
| $\chi = 1, \Phi = 1, \Omega = 2\pi,$ $r_3 = 2 м$ в) Звукоизоляция стены между аппаратной и радио и телестудией – кирпичная кладка толщиной 255 мм со смотровым окном со звукоизоляцией не меньшей величины г) Влияние диффузной составляющей помещения аппаратной д) УЗД, от излучения шума стеной радио и телестудии на рабочем месте в аппаратной | $\Delta L_3, \text{дБ}$ | | | | |
| | $R_{CT}, \text{дБ}$ | Из техдокументации на помещение | 41 | 48 | 65 |
| | $\Delta L_{2\partial}, \text{дБ}$ | $\Delta L_{2\partial} = 10 \lg \left(\frac{4}{\kappa_2 Q_2} \right)$ | -6 | -10 | -13 |
| | $L_{CT2}, \text{дБ}$ | $L_{CT2} = L_{WPTC} + \Delta L_3 + 10 \lg S_{CT} + \Delta L_{2\partial} - R_{CT}$ | 54 | 42 | 21 |
| 5. УЗД суммарного шума в аппаратной от воздуховода и от стены студии на рабочем месте в аппаратной при $\varepsilon = 5 \text{ дБ} [12]$ Норма шума в аппаратной (для измерительных и аналитических работ) Превышение нормы | $L_A, \text{дБ}$ | $L_A + 10 \lg (10^{0,1L_T} + 10^{0,1L_{CT2}}) + \varepsilon$ | 59 | 47 | 27 |
| | $L_H, \text{дБ}$ | СНиП 23-03-2003 Раздел 6 пункт 1 | 70 | 58 | 52 |
| 6. Потери звуковой мощности на прямолинейном участке | $(\delta_1 L_{WH2}) l_2, \text{дБ}$ | $\delta_1 L_{WH2}$ из таблицы 2., $l_2 = 4 м$ | 0,40 | 0,64 | 0,88 |
| 7. Цилиндрический воздуховод в аппаратной | УЗМ, излучаемой в воздуховод нагнетания студии, $L_{WH3}, \text{дБ}$ | $L_{WH3} = L_{WH2} - (\delta_1 L_{WH2}) l_2, \text{дБ}$ | 79 | 53 | 46 |

Таблица 5. Помещение 3, обслуживаемое системой (телерадиостудия)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|--|--|----|----|----|
| 1. Воздуховод нагнетания на входе в студию | УЗМ, излучаемой в воздуховод студии | Из таблицы 2 П, пункт 7. $L_{WH3}, \text{дБ}$ | 79 | 53 | 46 |
| 2. Тройник. Ветвь в студию $S_1 = \frac{1}{10} S = 3140 \text{ мм}^2,$ где $S = S_1 + S_2$ — площадь воздуховода до тройника | Потери звуковой мощности в сечении $S_1,$ $(\delta_2 L_{WH2})_1, \text{дБ}$ | $(\delta_2 L_{WH2}) = 10 \lg \left[\frac{S}{S_1} \right]$ | 10 | 10 | 10 |
| 3. Помещение, обслуживаемое системой. $V_3 = 384 \text{ м}^3, S_{\Pi} = 352 \text{ м}^2,$ $S_{\text{ПОЛА}} = 96 \text{ м}^2, r = 2 м$ | | | | | |

| | | | | | |
|--|---|--|------|-------|------|
| а) T_3, c | Время реверберации T_3, c | Из техзадания T_3, c | 0,64 | 0,8 | 0,96 |
| б) Q_3, m^2 | Постоянная з.п.ш. помещения, Q_3, m^2 | $Q_3 = \frac{0,16 V_3}{T_3}$ | 96,0 | 76,8 | 64,0 |
| в) α_{CP} | Средний коэффициент з.п.ш. помещения (не меньше) | $\alpha_{CP} = \frac{Q_3}{S_{\Pi}}$ | 0,27 | 0,22 | 0,18 |
| г) Выбранные плиты ПА/Д с воздушной прослойкой 100 мм – коробка в коробке | Средний коэффициент з.п.ш. помещения (по факту) | $\alpha_{CP\phi}$ | 0,25 | 0,40 | 0,20 |
| д) Выбранная постоянная звукопоглощения (по факту) | Q_{ϕ}, m^2 | $Q_{\phi} = \frac{\alpha_{CP\phi} S_{\Pi}}{1 - \alpha_{CP}}$ | 117 | 235 | 88 |
| е) Выбранные значения коэффициента нарушения диффузности (по факту) | κ_3 | СНиП 23-03-2003 Табл. 4. для $\alpha_{CP\phi}$. | 1,30 | 1,60 | 1,25 |
| ж) Влияние помещения при $\chi = 1, \Phi = 1, \Omega = \pi, r_3 = 2 m$ | Влияние помещения на шум от вентиляции $\Delta L_{3PTC}, \partial B$ | $\Delta L_{3PTC} = 10 \lg \left(\frac{1}{\pi r_3^2} + \frac{4}{\kappa_3 Q_{\phi}} \right)$ | -9,7 | -10,4 | -9,4 |
| 4. Поправка на внезапное расширение выхода при $\sqrt{S_1} = 56 mm$ | Отражение звука на выходе, $\Delta L_0, \partial B$ | С помощью таблицы 1 | 23,0 | 11,5 | 3,0 |
| 5. УЗД шума в радио и телестудии от СВ. Результаты расчета при $K_0 = 5 \partial B$ и при $\varepsilon = 10 \partial B$ [12] | УЗД в расчетной точке, $L_3, \partial B$ | $L_3 = L_{WH3} - (\delta_2 L_{WH2}) + \Delta L_{3PTC} - \Delta L_0 + K_0 + \varepsilon$ | 51 | 36 | 39 |
| Норма шума в студии | $L_{H3}, \partial B$ | СНиП 23-03-2003. Раздел 6 пункт 7 (для системы вентиляции — 5 дБ) | 47 | 34 | 27 |
| Превышение нормы | | | 4 | 2 | 12 |
| 6. Установка второго глушителя типа ГЦ 3 калибра, ППУ 40-08 С в воздуховоде студии перед тройником | Потери звуковой мощности в глушителе $(\delta_0 L_{WH1})_2, \partial B$ | Из техдокументации на глушитель | 5 | 12 | 16 |
| 7. Окончательный результат | УЗД в расчетной точке, $L_3, \partial B$ | $L_3 = L_{WH3} - (\delta_2 L_{WH2}) + \Delta L_{3PTC} - \Delta L_0 + K_0 + \varepsilon - (\delta_0 L_{WH1})_2$ | 46 | 24 | 23 |
| Превышение нормы | | $L_3 < L_{H3}$ | нет | нет | нет |

Заключение

Акустический расчет системы вентиляции и кондиционирования в современных зданиях необходим для выбора исходных средств защиты людей от шума, создаваемого системой. Эти средства должны соответствовать лучшему отечественному и зарубежному опыту в строительстве жилых, общественных и промышленных зданий. Окончательное акустическое решение производится по результатам акустических измерений уже построенной СВКВ, измерений, проводимых согласно действующим национальным или международным стандартам [10]. Предлагаемый выше акустический расчет апробирован, в частности, студентами пятого курса по дисциплине «Строительная акустика» (лектор д.т.н. профессор И.И. Боголепов) в курсовых проектах на кафедре «Технология, организация и экономика строительства» (ТОЭС) инженерно-строительного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Литература

1. Боголепов И.И. Современные способы борьбы с шумом в зданиях и на селитебных территориях // Инженерно-строительный журнал, № 2, 2009. СПб, 2009. С. 45-49.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М., 1957.
3. Исакович М.А. Общая акустика. М., 1973.
4. Справочник по судовой акустике / Под ред. И.И. Клюкина и И.И. Боголепова. Л., 1978.
5. Хорошев Г.А., Петров Ю.И., Егоров Н.Ф. Борьба с шумом вентиляторов. М., 1981.
6. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. Теория, исследования, проектирование, изготовление, контроль / Предисловие академика АН СССР И.А. Глебова. Л., 1986.
7. Изак Г.Д., Гомзиков Э.А. Шум на судах и методы его снижения. М., 1987.
8. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г.Л. Осипова и Е.Я. Юдина. М., 1987.
9. Звукоизоляция и звукопоглощение. Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Промышленное и гражданское строительство» и «Теплогазоснабжение и вентиляция» / под ред. Г.Л. Осипова и В.Н. Бобылева. М., 2004.
10. Боголепов И.И. Строительная акустика / Предисловие академика РАН Ю.С. Васильева. СПб, 2006.
11. Сотников А.Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Теория, техника и проектирование на рубеже столетий. СПб, 2007.
12. Боголепов И.И. Новый метод акустического расчета системы вентиляции и кондиционирования воздуха // С.О.К. (сантехника, отопление, кондиционирование), № 2/74, 2008. М., 2008. С. 110-117.
13. Строительные нормы и правила. СНиП II-12-77 «Защита от шума». Утверждены постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по делам строительства от 14 июня 1977 г. № 72. М., 1997.
14. Строительные нормы и правила СНиП 23-03-2003 «Защита от шума». Дата введения 2004-01-01. Разработаны Научно-исследовательским институтом строительной физики (НИИСФ) РААСН, внесены Управлением технического нормирования, стандартизации и сертификации в строительстве и ЖКХ Госстроя России, приняты и введены в действие постановлением Госстроя России от 30 июня 2003г. № 136, взамен СНиП II-12-77 «Защита от шума». Устанавливают обязательные требования, которые должны выполняться при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий различного назначения, планировке и застройке населенных мест с целью защиты от шума и обеспечения нормативных параметров акустической среды в производственных, жилых, общественных зданиях и на территории жилой застройки.
15. Боголепов И.И., Лапшина О.В., Окладникова О.Н. О повышении надежности звукоизоляции инженерных систем и строительных конструкций // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад, № 1 (33), 2008. СПб, 2008. С. 76-81.

**Игорь Ильич Боголепов, ГОУ СПбГПУ, ГОУ СПбГМТУ, Санкт-Петербург*

Тел. раб. 297-59-49, 535-79-92; эл. почта igor.bogolepov@mail.ru