

# Расчет пассивной виброизоляции

## 1. Методические указания

Вибрация - малые механические колебания, возникающие в упругих телах или телах, находящихся под воздействием переменного физического поля.

Вибрация (сотрясение) представляет собой материальный шум, передающийся на человека либо непосредственно от источника шума, либо по элементам конструкции производственных зданий.

Вибрация возникает при работе машин и механизмов, имеющих неуравновешенные и несбалансированные вращающиеся органы или органы с движениями возвратно-поступательного и ударного характера.

К такому оборудованию относятся металлообрабатывающие станки, ковочные и штамповочные молоты, электро- и пневмоперфораторы, механизированный инструмент, а также приводы, вентиляторы, насосные установки, поршневые и центробежные компрессоры, шлифовальные машины, вибраторы, паркетно-строгальные машины и др.

Вибрацию применяют при уплотнении бетонных смесей, дроблении и сортировке инертных материалов, разгрузке и транспортировании сыпучих материалов, рыхление мерзлого грунта, погружение свай и т.д.

Вибрация относится к факторам, обладающим высокой биологической активностью. Выраженность ответных реакций обуславливается главным образом силой энергетического воздействия и биомеханическими свойствами человеческого тела как сложной колебательной системы. Мощность колебательного процесса в зоне контакта и время этого контакта являются главными параметрами, определяющими развитие вибрационных патологий, структура которых зависит от частоты и амплитуды колебаний, продолжительности воздействия, места приложения и направления оси

вибрационного воздействия, демпфирующих свойств тканей, явлений резонанса и других условий.

Тело человека рассматривается как сочетание масс с упругими элементами, имеющими собственные частоты, которые для плечевого пояса, бедер и головы относительно опорной поверхности (положение «стоя») составляют 4...6 Гц; головы относительно плеч (положение «сидя») – 25...30 Гц. Для большинства внутренних органов собственной частоты лежат в диапазоне 6...9 Гц.

Местная вибрация малой интенсивности может благоприятно воздействовать на организм человека, улучшать функциональное состояние центральной нервной системы (ЦНС), ускорять заживление ран и т.п., но при увеличении интенсивности колебаний и длительности их воздействия возникают изменения, приводящие в ряде случаев к развитию профессиональной патологии – вибрационной болезни.

Вибрация представляет собой механические колебания, простейшим видом которых являются гармонические колебания.

Воздействие вибрации на человека классифицируют:

- по способу передачи колебаний;
- по направлению действия вибрации;
- по временной характеристике вибрации.

В зависимости от способа передачи колебаний человеку вибрацию подразделяют на: общую, передающуюся через опорные поверхности на тело сидящего или стоящего человека и, локальную, передающуюся через руки человека.

Вибрация, воздействующая на ноги сидящего человека, на предплечья, контактирующие с вибрирующими поверхностями рабочих столов, также относится к локальной.

При действии на организм общей вибрации страдает в первую очередь нервная система и анализаторы: вестибулярный, зрительный, тактильный. Вибрация является специфическим раздражителем для вестибулярного анализатора, причем линейные ускорения — для отолитового аппарата, расположенного в мешочках преддверия, а угловые ускорения — для полукружных каналов внутреннего уха.

Длительное систематическое воздействие вибрации приводит к развитию вибрационной болезни (ВБ), которая включена в список профессиональных заболеваний. Эта болезнь диагностируется, как правило, у работающих на производстве; в условиях населенных мест ВБ не регистрируется, несмотря на наличие многих источников вибрации (наземный и подземный транспорт, промышленные источники и др.).

Систематическое воздействие общих вибраций с высоким уровнем виброскорости приводит к вибрационной болезни, которая характеризуется нарушениями физиологических функций организма, связанными с поражением ЦНС. Эти нарушения вызывают головные боли, головокружения, нарушения сна, снижение работоспособности, ухудшение самочувствия, нарушения сердечной деятельности, расстройство зрения, онемение и отечность пальцев рук, заболевание суставов, снижение чувствительности.

Лица, подвергающиеся воздействию вибрации окружающей среды, чаще болеют сердечно-сосудистыми и нервными заболеваниями и обычно предъявляют много жалоб общесоматического характера.

Вибрация характеризуется скоростью ( $v$ , м/с) и ускорением ( $a$ , м/с<sup>2</sup>) колеблющейся твердой поверхности. Обычно эти параметры называют виброскоростью и виброускорением.

Величины виброскорости и виброускорения, с которыми приходится иметь дело человеку, изменяются в очень широком диапазоне. Поэтому в практику введены логарифмические величины — уровни виброскорости и виброускорения:  $L_v = 20\lg(v/v_0)$ ,  $L_a = 10\lg(a/a_0)$ .

Измеряются уровни в специальных единицах – децибелах (дБ). За пороговые значения виброскорости и виброускорения приняты стандартизованные в международном масштабе величины:  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с,  $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>.

Важной характеристикой вибрации является его частота  $f$  – количество колебаний в единицу времени. Частота измеряется в герцах (Гц, 1/с) – количестве колебаний в секунду. Частоты производственных вибраций изменяются в широком диапазоне: от 0,5 до 8000 Гц. Время, в течение которого происходит одно колебание, называется периодом колебания  $T$  (с):  $T = 1/f$ . Максимальное расстояние, на которое перемещается любая точка вибрирующего тела, называется амплитудой виброперемещения  $A$  (м).

Вибрация может характеризоваться одной или несколькими частотами (дискретный спектр) или широким набором частот (непрерывный спектр). Спектр частот разбивается на частотные полосы (октавные диапазоны). В октавном диапазоне верхняя граничная частота  $f_2$  вдвое больше нижней граничной частоты  $f_1$ , т.е.  $f_2/f_1 = 2$ . Октавная полоса характеризуется ее среднегеометрической частотой  $f_{\text{ср}} = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$ .

Среднегеометрические частоты октавных полос частот вибрации стандартизованы и составляют: 1, 2, 4, 8, 16, 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000 Гц.

Гигиеническое нормирование вибраций регламентирует параметры производственной вибрации и правила работы с виброопасными механизмами и оборудованием, ГОСТ 12.1.012-2004 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования», Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий».

Документы устанавливают: классификацию вибраций, методы гигиенической оценки, нормируемые параметры и их допустимые значения, режимы труда лиц виброопасных профессий, подвергающихся воздействию

локальной вибрации, требования к обеспечению вибробезопасности и к вибрационным характеристикам машин.

Устанавливаются допустимые значения виброскорости и виброускорения, а также их логарифмические уровни (табл. 1). Допустимые значения устанавливаются отдельно для общей и локальной вибрации. Общая вибрация нормируется в диапазонах октавных полос со среднегеометрическими значениями частот 2, 4, 8, 16, 31,5, 63 Гц (для транспортной вибрации дополнительно нормируется вибрация в октавной полосе с  $f_{ср} = 1$  Гц). Локальная вибрация нормируется в диапазонах частот  $f_{ср} = 16, 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000$  Гц. Нормы установлены для продолжительности рабочей смены в 8 часов.

Таблица 1

Предельно допустимые значения вибрации на постоянных рабочих местах производственных помещений предприятий (СН 2.2.4/2.1.8.566-96)

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Предельно допустимые значения			
	виброускорения		виброскорости	
	м/с <sup>2</sup>	дБ	м/с · 10 <sup>-2</sup>	дБ
2,0	0,14	103	1,30	108
4,0	0,10	100	0,45	99
8,0	0,10	100	0,22	93
16,0	0,20	106	0,20	92
31,5	0,40	112	0,20	92
63,0	0,79	118	0,20	92

Для устранения вредного воздействия вибрации на работающих должны применяться следующие мероприятия:

- снижение вибрации в источнике ее образования конструктивными или технологическими мерами;

- уменьшение вибрации на пути ее распространения средствами виброизоляции и вибропоглощения;
- дистанционное управление, исключающее передачу вибрации на рабочие места;
- средства индивидуальной защиты (рукавицы и перчатки с виброзащитными прокладками, обувь с виброзащитной стелькой из каучука, пластмассы или резины).

Виброизоляция – это уменьшение уровня вибрации защищаемого объекта путем уменьшения передачи колебаний этому объекту от источника колебаний.

Виброизоляция достигается путем установки агрегатов на специальные упругие устройства (опоры), обладающие малой жесткостью.

Эффективность виброизоляции оценивается коэффициентом передачи  $k_{\text{п}}$ , который имеет физический смысл отношения силы, действующей на основание при наличии упругой связи, к силе, действующей при жесткой связи. Чем это отношение меньше, тем лучше виброизоляция. Хорошая виброизоляция достигается при  $k_{\text{п}} = 1/8 \dots 1/15$ .

Для виброизоляции машин с вертикальной возмущающей силой применяют виброизолирующие опоры 3-х типов: резиновые, пружинные и комбинированные. Пружинные по сравнению с резиновыми имеют ряд преимуществ. Они могут применяться для изоляции как низких, так и высоких частот (обеспечивают любую деформацию), дольше сохраняют постоянство упругих свойств во времени, хорошо противостоят действию масел и высокой температуры, относительно малогабаритны. Однако металлические пружины имеют тот недостаток, что будучи спроектированы на низкую частоту, они пропускают более высокие.

Часто при работе машин и оборудования возбуждаются недопустимо сильные колебания железобетонного перекрытия, на котором расположено рабочее место оператора. Эти вибрации отрицательно воздействуют на здоровье оператора. Основным способом защиты рабочих мест в таких случаях

является использование пассивной виброизоляции, когда между площадкой оператора и основанием устанавливают пружинные виброизоляторы.

Расчет пассивной виброизоляции ведется в следующей последовательности.

1. Определить колебательную скорость (виброскорость) перекрытия по формуле:

$$v = 2 \pi f A_z, \text{ см/с,}$$

где:  $f$  – частота вынужденных колебаний основания, Гц;

$A_z$  – фактическая амплитуда колебаний основания, см.

2. Определить требуемый коэффициент виброизоляции по формуле:

$$k_{\Pi} = v_0 / v < 1$$

где:  $v_0$  – предельно допустимое значение виброскорости в соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий».

Этот коэффициент должен быть намного меньше единицы, чтобы выполнить требования санитарных норм по ограничению вибрации. При практических расчетах часто задаются коэффициентом передачи:  $k_{\Pi} = 1/40 \dots 1/60$ .

3. Определить частоту свободных (собственных) вертикальных колебаний площадки по формуле:

$$f_0 = \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{k_{\Pi}} + 1}}, \text{ Гц.}$$

4. Зная вес площадки  $Q_1$ , кг и вес оператора  $Q_2$ , кг, рассчитать общий вес, равный  $Q = Q_1 + Q_2$  (кг).

Следует иметь в виду, что для площадок, устанавливаемых на колеблющееся основание (пол цеха, междуэтажное перекрытие и т.п.) вес плиты должен превышать не менее чем в 2-3 раза вес рабочих, которые могут находиться на площадке.

Определить суммарную жесткость пружин этой площадки по формуле:

$$K_z = \frac{Q \cdot f_0^2}{25}, \text{ кг/см.}$$

5. Определить статическую осадку всех пружин по формуле:

$$X_{\text{ст}} = \frac{Q}{K_z}, \text{ см.}$$

6. Определить жесткость одного амортизатора:

$$K'_z = \frac{K_z}{n}, \text{ кг/см,}$$

где  $n$  – количество амортизаторов (пружины).

7. Определить расчетную нагрузку на одну пружину по формуле:

$$P' = P_{\text{ст}} + 1,5P_{\text{дин}} = \frac{Q_1}{n} + 1,5 \frac{Q_2}{n^1}, \text{ кг,}$$

где  $n^1 = 2$ , принимается из условий, что вес оператора распределяется на две пружины.

8. Определить диаметр прутка пружины по формуле:

$$d = 1,6 \sqrt{\frac{kP'C}{[\tau]}}, \text{ см,}$$

где:  $C = D/d$  – индекс пружины – отношение среднего диаметра пружины  $D$  к диаметру прутка  $d$ . Рекомендуется принимать значение в пределах 4...10;

$k = 1,18$  – коэффициент определяется в зависимости от индекса пружины  $C$ ;

$[\tau]$  – допускаемое напряжение на кручение (на срез, на сдвиг) для материала пружины. Для стали  $[\tau] = 4500 \text{ кг/см}^2$ .

Расчетный диаметр  $d$  прутка пружины округлить до диаметра  $d_1$ , принятого в ГОСТ 9389-75\* «Проволока стальная углеродистая пружинная. Технические условия».

9. Проверить условие обеспечения допустимого напряжения на сдвиг в материале пружины по формуле:

$$\frac{2,56kP'C}{d_1^2} \leq [\tau].$$

10. Определить число рабочих витков пружины по формуле:

$$i_1 = \frac{Gd_1}{8K'_z C^3}$$

где  $G$  – модуль упругости на сдвиг для материала пружины, для стали  $G = 8 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>.

11. Определить полное число витков пружины:

$$i = i_1 + i_2,$$

где  $i_2$  – число нерабочих витков принимают:

$i_2 = 1,5$  витка на оба торца при  $i_1 < 7$ ;

$i_2 = 2,5$  витка при  $i_1 \geq 7$ .

12. Определить шага витка пружины из условий

$$h = (0,25 \dots 0,50) \cdot D, \text{ см},$$

где  $D = C \cdot d_1$ , см.

13. Определить высоту ненагруженной пружины

$$H_0 = i_1 \cdot h + (i_2 - 0,5)d_1, \text{ см}.$$

При расчете пружин, работающих на сжатие, для выполнения условия устойчивости необходимо, чтобы отношение высоты ненагруженной пружины к ее среднему диаметру было не более 1,5.

В результате расчета должно быть:  $\frac{H_0}{D} \leq 1,5$ .

Осадка виброизолятора, на котором установлена пассивно-виброизолированная плита, при перемещениях по плите одного человека, вес которого принимается равным 80 кг, не должна превышать 10 мм.

Если указанная осадка плиты будет более 10 мм, то рекомендуется виброизолятор устраивать из двух концентрических пружин, соединенных параллельно с зазором между опорными плоскостями пружин.

## 2. Пример расчета

Пульт управления оборудованием, установлен на одном из перекрытий промышленного здания. От вибрации оборудования на перекрытии также возникают вибрации, вредно действующие на здоровье оператора.

В целях снижения уровня вибрации до допустимых величин, предусмотренных санитарными нормами, необходимо рассчитать пассивно-виброизолированную площадку, на которой должен находиться оператор.

Исходные данные: перекрытие колеблется с частотой  $f = 50$  Гц и амплитудой  $A_z = 0,015$  см, вес площадки  $Q_1 = 200$  кг.

Решение:

1. Определяем колебательную скорость (виброскорость) перекрытия по формуле:

$$v = 2 \pi f A_z = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,015 = 4,71 \text{ см/с.}$$

2. Определяем допустимую величину виброскорости по санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.566-96 (см. табл. 1):  $v_0 = 0,2 \cdot 10^{-2}$  м/с = 0,2 см/с.

Сравнивая допустимую по нормам виброскорость с подсчитанной виброскоростью перекрытия делаем вывод о необходимости применения пассивно-виброизолирующей площадки.

3. Определяем требуемый коэффициент виброизоляции по формуле:

$$k_{\text{н}} = v_0 / v = 0,2 / 4,71 = 0,042 \approx 1/24$$

4. Определяем частоту свободных (собственных) вертикальных колебаний площадки по формуле:

$$f_0 = \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{k_{\text{н}}} + 1}} = \frac{50}{\sqrt{\frac{1}{0,042} + 1}} = 8,479 \text{ Гц.}$$

5. Приняв вес оператора  $Q_2 = 80$  кг, вычисляем общий вес  $Q = Q_1 + Q_2 = 200 + 80 = 280$  кг и определяем суммарную жесткость всех пружин этой площадки по формуле:

$$K_z = \frac{Q \cdot f_0^2}{25} = \frac{280 \cdot 8,479^2}{25} = 805,2 \text{ кг/см.}$$

6. Определяем статическую осадку всех пружин по формуле:

$$X_{ст} = \frac{Q}{K_z} = \frac{280}{805,2} = 0,35\text{см.}$$

Следует иметь в виду, что для площадок, устанавливаемых на колеблющееся основание (пол цеха, междуэтажное перекрытие и т.п.) вес плиты должен превышать не менее чем в 2-3 раза вес рабочих, которые могут находиться на площадке.

7. Определяем жесткость одного амортизатора (пружины):

$$K'_z = \frac{K_z}{n} = \frac{805,2}{8} = 100,7\text{кг/см,}$$

где  $n = 8$  – принятое из конструктивных соображений количество амортизаторов (пружины).

8. Определяем расчетную нагрузку на одну пружину по формуле:

$$P' = P_{ст} + 1,5P_{дин} = \frac{Q_1}{n} + 1,5 \frac{Q_2}{n^1} = \frac{200}{8} + 1,5 \frac{80}{2} = 85\text{кг,}$$

где  $n^1 = 2$ , принимаем, что вес оператора распределяется на две пружины.

9. Определяем диаметр прутка пружины по формуле:

$$d = 1,6 \sqrt{\frac{kP'C}{[\tau]}} = 1,6 \sqrt{\frac{1,18 \cdot 85 \cdot 8}{4500}} = 0,67 \text{ см,}$$

где:  $C = 8$  – принятый индекс пружины;

$k = 1,18$  – коэффициент, зависящий от индекса пружины  $C$ ;

$[\tau]$  - допускаемое напряжение на кручение (на срез, на сдвиг) для материала пружины. Для стали  $[\tau] = 4500 \text{ кг/см}^2$ .

Расчетный диаметр  $d$  прутка пружины округляем до диаметра  $d_1 = 0,7\text{см}$ , принятого в ГОСТ 9389-75\* «Проволока стальная углеродистая пружинная. Технические условия».

10. Проверяем условие обеспечения допустимого напряжения на сдвиг в материале пружины по формуле:

$$\frac{2,56kP'C}{d_1^2} = \frac{2,56 \cdot 1,18 \cdot 85 \cdot 8}{0,7^2} = 4192,1 \text{ кг} / \text{см}^2 \leq [\tau] = 4500 \text{ кг} / \text{см}^2.$$

Условие выполнено.

11. Определяем число рабочих витков пружины по формуле:

$$i_1 = \frac{Gd_1}{8K_z'C^3} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,7}{8 \cdot 100,7 \cdot 8^3} = 1,36 \approx 2 \text{ витка},$$

где  $G$  – модуль упругости на сдвиг для материала пружины: для стали  $G = 8 \cdot 10^5 \text{ кг} / \text{см}^2$ .

12. Определяем полное число витков пружины:

$$i = i_1 + i_2 = 2 + 1,5 = 3,5 \text{ витка},$$

где  $i_2$  – число нерабочих витков пружины принимаем  $i_2 = 1,5$  при  $i_1 < 7$ .

13. Определяем шаг витка пружины  $h = 0,25D = 0,25 \cdot 5,6 = 1,4 \text{ см}$

где  $D = C \cdot d_1 = 8 \cdot 0,7 = 5,6 \text{ см}$  – диаметр пружины.

14. Определяем высоту ненагруженной пружины

$$H_0 = i \cdot h + (i_2 - 0,5)d_1 = 3,5 \cdot 1,4 + (1,5 - 0,5)0,7 = 5,6 \text{ см}.$$

15. Проверяем условие устойчивости пружины:

$$\frac{H_0}{D} = \frac{5,6}{5,6} = 1 \leq 1,5.$$

Условие выполнено.