

**№ 2368**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра техносферной безопасности

# **Безопасность жизнедеятельности**

Учебное пособие

Под редакцией профессора Е.П. Потоцкого

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров:  
150400 – Металлургия



Москва 2013

УДК 628.5  
Б40

Рецензент  
д-р техн. наук, проф. *Л.С. Стрижко*

**Безопасность жизнедеятельности** : Учеб. пособие / О.М. Зиновьева, Б.С. Мاستрюков, А.М. Меркулова [и др.]; Под ред. Е.П. Потоцкого. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 147 с.  
ISBN 978-5-87623-738-5

Учебное пособие относится к основной учебной литературе по курсу «Безопасность жизнедеятельности». Приведены методы расчета искусственного освещения производственных помещений, естественной и механической вентиляции, средств защиты от теплового излучения, средств защиты от поражения электрическим током, защиты от ионизирующего излучения, средств защиты от шума и вибрации, а также категорирование помещений по взрывопожарной и пожарной опасности.

Соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины «Безопасность жизнедеятельности».

Предназначено для студентов всех направлений подготовки НИТУ «МИСиС».

**УДК 628.5**

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
1. Расчет искусственного освещения производственных помещений.....	5
2. Расчет естественной общеобменной и местной вытяжной вентиляции .....	25
3. Расчет средств защиты от теплового излучения.....	43
4. Расчет средств защиты от поражения электрическим током .....	66
5. Расчет средств защиты от ионизирующего излучения .....	79
6. Расчет средств защиты от вибрации .....	103
7. Расчет средств защиты от шума.....	117
8. Категорирование помещений по взрывопожарной и пожарной опасности.....	133

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие современного общества немыслимо без решения проблем, связанных с безопасностью жизнедеятельности. Среда обитания современного человека и производственная среда особенно содержат источники опасности. К опасным и вредным факторам антропогенного происхождения относятся, например, ионизирующие излучения, шумовые и тепловые поля, загазованность и запыленность среды и т.д. Решение проблемы безопасности жизнедеятельности состоит в защите человека и среды обитания от воздействия вредных и опасных факторов, превышающих допустимые значения.

Учебное пособие состоит из восьми разделов, каждый из которых может рассматриваться независимо от других. Разделы включают теоретические введения по изучаемому вопросу, методики расчета устройств защиты, задачи для самостоятельного решения, алгоритмы расчета, библиографические списки.

Учебное пособие предназначено для проведения практических занятий по курсу «Безопасность жизнедеятельности» и может быть использовано при самостоятельном выполнении студентами расчетов (в домашних заданиях, в курсовых и дипломных исследовательских и проектных работах) технических защитных устройств. Выполнение расчетов устройств защиты от опасных и вредных факторов способствует закреплению теоретических знаний по курсу «Безопасность жизнедеятельности».

# 1. РАСЧЕТ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

## 1.1. Основные понятия и определения

Производственное освещение характеризуется количественными и качественными показателями.

К *количественным показателям* относят:

1. *Световой поток*,  $\Phi$  – количество энергии, излучаемой источником света, лм (люмен).

2. *Сила света*,  $I$  – пространственная плотность светового потока  $\Phi$  внутри телесного угла  $\omega$ , кд (кандела).

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

3. *Освещенность*,  $E$  – поверхностная плотность светового потока, лк (люкс).

$$E = \frac{d\Phi}{dS},$$

где  $S$  – площадь освещаемой поверхности, м<sup>2</sup>.

4. *Яркость*,  $B$  – световое ощущение, создаваемое объектом на сетчатке глаза наблюдателя, кд/м<sup>2</sup>. Поверхностная плотность силы света в заданном углом  $\alpha$  направлении.

$$B = \frac{dI}{dS \cdot \cos \alpha},$$

где  $I$  – сила света, излучаемого поверхностью  $S$  в направлении  $\alpha$ , кд;

$dS \cdot \cos \alpha$  – видимая под углом  $\alpha$  площадь источника света, м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь источника света, м<sup>2</sup>.

Кроме перечисленных величин, на условия зрительной работы влияют дополнительные факторы, служащие для *качественной оценки* условий зрительной работы.

1. *Коэффициент отражения*,  $\rho$  – характеризует способность поверхности отражать падающий на нее световой поток.

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_{\text{пад}}},$$

где  $\Phi_{\text{отр}}$  – световой поток отраженный поверхностью, лм;

$\Phi_{\text{пад}}$  – световой поток, падающий на поверхность, лм.

2. **Фон** – поверхность, которая непосредственно прилегает к объекту различения. Фон характеризуется коэффициентом отражения световых лучей. Фон считается светлым при  $\rho > 0,4$ ; средним –  $\rho = 0,2 \dots 0,4$  и темным  $\rho < 0,2$ .

3. **Контраст объекта различения с фоном,  $K$**  – отношение абсолютной величины разности между яркостью объекта и фона к яркости фона.

$$K = \frac{|B_{\phi} - B_o|}{B_{\phi}},$$

где  $B_{\phi}$  – яркость фона, кд/м<sup>2</sup>;

$B_o$  – яркость объекта различения, кд/м<sup>2</sup>.

Контраст считают большим при  $K > 0,5$ ; средним при  $K = 0,2 \dots 0,5$  и малым при  $K < 0,2$ .

4. **Коэффициент пульсации светового потока,  $K_E$**  – критерий оценки относительной глубины колебаний освещенности в результате изменения во времени светового потока газоразрядных ламп при питании их переменным током, %.

$$K_E = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{2 \cdot E_{\text{cp}}} \cdot 100,$$

где  $E_{\text{max}}$ ,  $E_{\text{min}}$ ,  $E_{\text{cp}}$  – максимальное, минимальное и среднее значения освещенности за период колебаний, лк.

Достаточная освещенность на рабочих местах обеспечивается выполнением нормативных требований установленных СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» [1], приведенных в табл. 1.1. При нормировании искусственного освещения нормируется минимальная освещенность на рабочем месте ( $E_n$ , лк) в зависимости от разряда и подразряда зрительной работы, устанавливаемых по характеристике зрительной работы, наименьшему размеру объекта различения, характеристике фона и контраста, с учетом системы освещения.

Таблица 1.1

## Освещенность производственных помещений

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк		
						Комбинированное освещение		Общее освещение
						всего	в т.ч. от общего освещения	
I	2	3	4	5	6	7	8	9
наивысшей точности	менее 0,15	I	a	малый	темный	5000	500	—
			б	малый	средний	4000	400	1250
			в	малый	светлый	2500	300	750
очень высокой точности	от 0,15 до 0,30	II	г	средний	светлый	1500	200	400
			а	малый	темный	4000	400	—
			б	малый	средний	3000	300	750
высокой точности	свыше 0,30 до 0,50	III	в	малый	светлый	2000	200	500
			г	средний	светлый	1000	200	300
			а	малый	темный	2000	200	500
средней точности	свыше 0,50 до 1,0	IV	б	малый	средний	1000	200	300
			в	малый	светлый	750	200	300
			г	средний	светлый	400	200	200
малой точности	свыше 1 до 5	V	а	малый	темный	750	200	300
			б	малый	средний	500	200	200
			в	малый	светлый	400	200	200
грубая (очень малой точности)	более 5	VI	г	средний	светлый	—	—	200
			а	малый	темный	400	200	300
			б	малый	средний	—	—	200
работа со светящимися материалами и изделиями в горячих цехах	более 0,5	VII	в	малый	светлый	—	—	200
			г	средний	светлый	—	—	200
			г	средний	светлый	—	—	200
общее наблюдение за ходом процесса (постоянное)	—	VIII	—	независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном		—	—	200
			—	то же		—	—	200
			а	»		—	—	200

Искусственное освещение в соответствии с СП 52.13330.2011 [1] может быть двух систем:

- **общее** (светильники размещают на потолке): **общее равномерное** (равномерное, с распределением светового потока независимо от размещения оборудования) и **локализованное** (с учетом размещения рабочих мест, что позволяет создать их наилучшую освещенность);
- **комбинированное** (сочетание общего и местного освещения).

## 1.2. Источники света и осветительные приборы

Осветительный прибор (электрический светильник) – совокупность источника света (лампы) и осветительной арматуры (отражатель, рассекатель и др.).

**Источники света**, применяемые для искусственного освещения производственных помещений, подразделяют на следующие основные группы: лампы накаливания, газоразрядные лампы и светодиодные лампы.

*Лампы накаливания общего назначения* могут применяться практически везде, где не предъявляется больших требований к освещенности, а потребление и срок службы не являются определяющими факторами. В маркировке ламп накаливания буква В обозначает вакуумные лампы, Г – газонаполненные лампы, К – лампы с криптоновым наполнением, Б – биспиральные лампы с аргоновым наполнением, РН – различного назначения. Улучшенные лампы накаливания, за счет добавления в газонаполнитель галогенных элементов (фтора, брома, йода, хлора), уменьшающих скорость испарения вольфрама, называют *галогенными лампами накаливания* – КГ. Лампы накаливания применяют для: внутреннего освещения домов, офисов, магазинов и т.п. и внешнего освещения (реклама, стоянки, освещение строительных объектов). В настоящее время лампы накаливания выводят из обращения, устанавливая вместо них газоразрядные или светодиодные лампы. Применение ламп накаливания общего назначения для освещения ограничивается Федеральным законом от 23 ноября 2009 г. №261–ФЗ [2]. С 1 января 2011 г. не допускается применение для освещения ламп накаливания общего назначения мощностью 100 Вт и более (планируется к 2014 году – 25 Вт и более).

*Газоразрядные лампы* подразделяют на две группы: лампы низкого и лампы высокого давления. *Газоразрядные лампы низкого давления* – натриевые и ртутные лампы низкого давления (давление внутри лампы не превышает 104 Па) и люминесцентные. *Люминесцент-*



ные лампы бывают: прямые трубчатые и компактные (энергосберегающие). В маркировке таких ламп используются следующие обозначения: ЛД – дневного света; ЛБ – белого света; ЛБЦ – близкие к дневному; ЛТБ – тепло-белого света; ЛХБ – холодно-белого света; ЛДЦ – с исправленной цветопередачей и т.п. Применяют такие лампы для внутреннего освещения жилых и общественных помещений. Для общего освещения, как правило, применяют прямые лампы в основном мощностью 40, 65, 80 и 150 Вт.

*Газоразрядные лампы высокого давления:* металлогалогенные, натриевые, ртутные, ксеноновые и др. Такие лампы применяют в промышленности и для освещения улиц.

Металлогалогенные лампы обозначают ДРИ (дуговая ртутная с излучающими добавками (йодиды и бромиды металлов)), ДРИЗ (с зеркальным слоем), натриевые – ДНаТ (дуговая натриевая трубчатая), ртутные – ДРЛ (дуговая ртутная), ДРЛР (дуговая рефлекторная ртутная), ксеноновые – ДКсТ (дуговая ксеноновая трубчатая) и т.п.

В производственных зданиях наиболее часто применяют четырехэлектродные лампы ДРЛ, мощностью 250, 400, 700, 1000 и 2000 Вт.

Лампы ДРЛ, ДРИ, ДНаТ и др. имеют резьбовые цоколи, аналогичные цоколям ламп накаливания общего назначения.

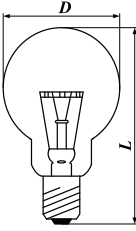
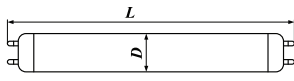
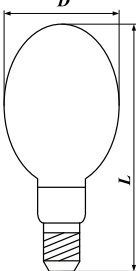
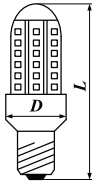
Для невысоких помещений (высота менее 4,5 м) при повышенных требованиях к качеству освещения используют люминесцентные лампы. Для высоких помещений (высота 10...12 м и более) преимущественно используют лампы высокого давления (ДРЛ, ДРИ и др.).

Лампы высокого давления, как правило, используют по одной в светильнике, а лампы люминесцентные трубчатые от 2 до 8.

*Светодиодные лампы* – наиболее перспективные источники света. Одно из самых главных достоинств – крайне низкое энергопотребление. Основной недостаток таких ламп – их высокая стоимость по сравнению со всеми другими лампами, однако это частично компенсируется их долгим сроком службы. Такие лампы выпускают с различными цоколями или непосредственно встраивая светодиоды в светильник. Обозначение ламп очень широкое и зависит от производителя.

В табл. 1.2. представлены основные характеристики и общий вид некоторых наиболее распространенных источников света.

## Общий вид и основные характеристики источников света

Обозначение и мощность ламп	Световой поток ламп, лм	Габаритные размеры, мм	Общий вид
<i>Лампы накаливания общего назначения</i>			
Б 40	430	$D=61, L=110$	
Б 60	730		
Б 75	940		
Б 100	1360		
Б 150	2160	$D=65, L=130$	
Г 300	4800	$D=100, L=230$	
Г 500	8400		
Г 750	13100	$D=111, L=240$	
<i>Люминесцентные лампы</i>			
ЛБ 18	1060	$D=26, L=604$	
ЛБ 40	3000	$D=39, L=1214$	
ЛБ 65	4600	$D=38, L=1514$	
ЛБ 80	5200	$D=41, L=1514$	
ЛД 40	2300	$D=39, L=1214$	
ЛД 65	3750	$D=41, L=1514$	
<i>Газоразрядные лампы высокого давления</i>			
ДРИ 250	19500	$D=91, L=227$	
ДРИ 400	36000	$D=62, L=330$	
ДРИ 700	60000	$D=152, L=370$	
ДРИ 1000	80000	$D=80, L=405$	
ДРЛ 80	3600	$D=71, L=166$	
ДРЛ 125	6000	$D=76, L=178$	
ДРЛ 250	13500	$D=91, L=228$	
ДРЛ 400	23700	$D=122, L=292$	
ДРЛ 700	40800	$D=152, L=357$	
ДРЛ 1000	58500	$D=167, L=411$	
ДНаТ 70	6000	$D=42, L=165$	
ДНаТ 100	9800		
ДНаТ 150	15000	$D=48, L=211$	
ДНаТ 400	45000	$D=48, L=278$	
ДНаТ 1000	130000	$D=66, L=390$	
<i>Светодиодные лампы</i>			
ЛМС-2,5	250	$D=50, L=96$	
ЛМС-4	400	$D=60, L=118$	
ЛМС-9	900	$D=65, L=102$	
ЛМС-15	1500	$D=79, L=198$	
ЛМС-20	2000	$D=72, L=232$	
ЛМС-25	2500	$D=75, L=266$	
ЛМС-30	3000	$D=75, L=300$	
СК 6	50000	$D=40, L=75$	

Обозначение и мощность ламп	Световой поток ламп, лм	Габаритные размеры, мм	Общий вид
T8–10	650	$D=29,5,$ $L=600$	
T10–20	2000	$D=40,$ $L=1200$	
T10–22	1600	$D=30,$ $L=1513$	

**Электрические светильники** в зависимости от распределения светового потока в пространстве подразделяют на следующие классы:

- **прямого** света (не менее 90 % светового потока направлено в нижнюю полусферу). Такие светильники наиболее экономичны;
- **рассеянного** света (световой поток распределен равномерно в обе полусферы по 40...60 %);
- **отраженного** света (не менее 90 % светового потока направлено в верхнюю полусферу).

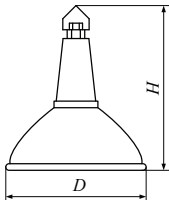
В производственных помещениях используют преимущественно светильники прямого света. В административно-конструкторских помещениях и лабораториях используют светильники прямого и рассеянного света. Светильники отраженного света применяют, в основном, для архитектурного освещения зданий.

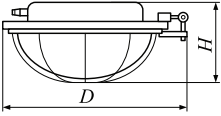
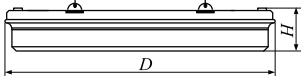
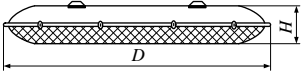
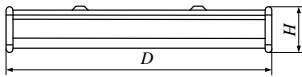
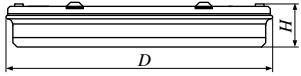
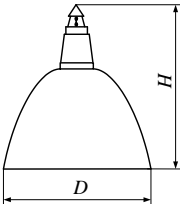
В зависимости от условий эксплуатации по конструктивному исполнению светильники могут быть выполнены в пыленепроницаемом, влагозащитном, взрывобезопасном и др. исполнении.

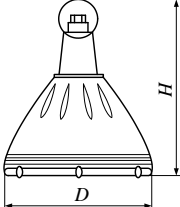
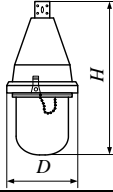
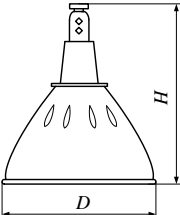
В табл. 1.3 представлены общий вид и некоторые характеристики светильников, применяемых для освещения производственных помещений.

Таблица 1.3

### Типы светильников

Обозначение светильника	Количество ламп, устанавливаемых в светильнике, шт	Общий вид	Габаритные размеры*, мм
<i>Светильники для ламп накаливания общего назначения</i>			
НСП 17	1 шт (до 1000 Вт); применяют для общего освещения производственных помещений		$D=220...470,$ $H=250...500$

Обозначение светильника	Количество ламп, устанавливаемых в светильнике, шт	Общий вид	Габаритные размеры*, мм
НПП 03	1 шт (60...100 Вт) или 2 шт (40 Вт); применяют в производственных помещениях с повышенным содержанием пыли и влаги		D=305, H=180
<i>Светильники для люминесцентных ламп</i>			
ЛСП 22	2 шт (40...65 Вт); можно монтировать индивидуально и в линию		D=1625, H=148...226
ЛСП 44	1 или 2 шт (35...70 Вт); для общего освещения сырых и пыльных промышленных зданий, помещений с химически агрессивными средами		D=1279, H=97
ЛПО 46	1 или 2 шт (до 40 Вт); для общего освещения общественных помещений, магазинов, офисов, больниц, школ, спортзалов		D=1280, H=63...230
ПВЛМ	2 шт (40 Вт); для общего освещения промышленных и общественных помещений с повышенным содержанием пыли и влаги		D=1325, H=226
<i>Светильники для газоразрядных ламп высокого давления</i>			
ГСП 17	1 шт (до 2000 Вт); для общего освещения производственных зданий с высокими пролетами (высота установки от 6 до 12 м)		D=320...676, H=405...590

Обозначение светильника	Количество ламп, устанавливаемых в светильнике, шт	Общий вид	Габаритные размеры*, мм
РСП 12	1 шт (250, 400, 700 Вт); для общего освещения производственных зданий с высокими пролетами (высота установки от 6 до 12 м)		$D=500$ , $H=500$
РСП 38М	1 шт (80, 125, 250 Вт); для общего освещения взрывоопасных зон всех классов		$D=260$ , $H=510$
ЖСП 01	1 шт (150, 250, 400 Вт); для общего освещения производственных зданий с высокими пролетами (высота установки от 6 до 12 м)		$D=320...471$ , $H=395...540$
<i>Светильники для светодиодных ламп</i>			
Светильники с непосредственно встроенными светодиодами (светодиодные модули) различны по своей конструкции и исполнению. Светодиодные лампы, выполняемые с цоколем ламп накаливания или газоразрядных ламп, применяют в соответствующих светильниках, указанных выше.			

\* Габаритные размеры светильников зависят от мощности лампы.

### 1.3. Размещение светильников в помещении

При размещении светильников в помещении для создания общего равномерного освещения необходимо учитывать тип источника света. Светильники *точечного типа* (с лампами накаливания, ДРЛ, ДнаТ, ДРИ, компактными люминесцентными и др.) наиболее рационально располагать по вершинам прямоугольников или в шахматном порядке. *Линейные светильники* (с длинными люминесцентными или светодиодными лампами) чаще всего располагают рядами параллельно стенам с окнами или длинной стороне помещения

(см. рис. 1.1). Для соблюдения указанного порядка расположения светильников допускается незначительное увеличение их числа. При размещении крайних светильников рекомендуется расстояния до стены принимать 0,3...0,5 расстояния между светильниками.

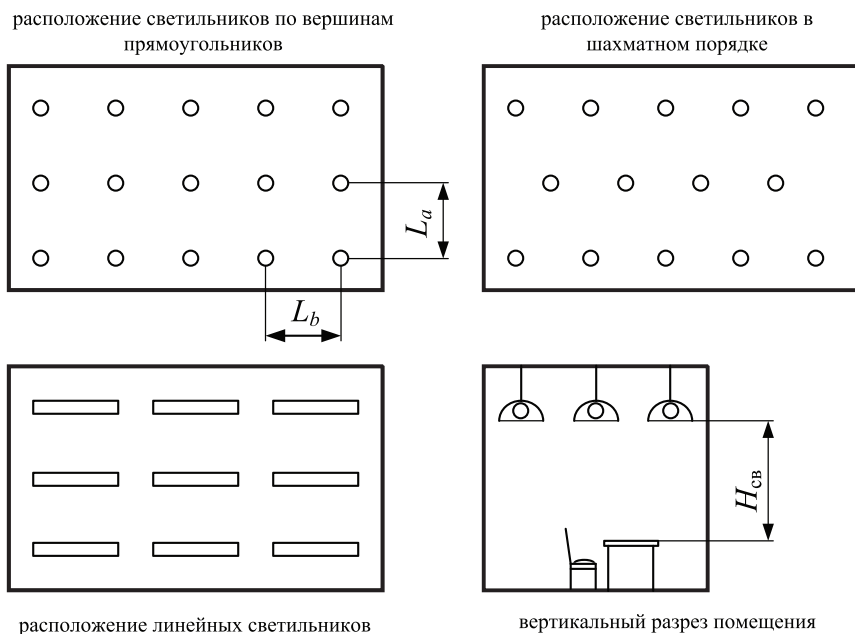


Рис. 1.1. Схема размещения светильников

## 1.4. Методы расчета искусственного освещения

Расчет искусственного освещения сводится к определению типа и количества светильников, необходимых для создания заданной освещенности. Существует три метода расчета:

- **По коэффициенту использования светового потока.** Метод используют для расчета общего равномерного освещения горизонтальной рабочей поверхности. Позволяет рассчитывать также среднюю освещенность горизонтальной поверхности с учетом всех падающих на нее потоков, как прямых, так и отраженных.

- **Точечный метод** расчета освещения позволяет определить освещенность в любой точке поверхности освещаемого помещения независимо от размещения светильников. Часто используют как проверочный метод для расчета освещенности в характерных точках поверхности.

- **Метод удельной мощности** является производным от метода коэффициента использования. Более простой, но менее точный, этот метод применяют при ориентировочных расчетах общего равномерного освещения, например, на стадии проектирования.

## 1.5. Расчет искусственного освещения по коэффициенту использования светового потока

При расчете искусственного освещения по коэффициенту использования светового потока  $\eta$  учитывается отношение светового потока, падающего на освещаемую поверхность, к суммарному световому потоку, создаваемому всеми источниками света в помещении:

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{р.п.}}}{\Phi_{\text{о.у.}}} = \frac{\Phi_{\text{р.п.}}}{N_{\text{св}} \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot n},$$

где  $\Phi_{\text{р.п.}}$  – световой поток, падающий на рабочее место, лм;  
 $\Phi_{\text{о.у.}}$  – световой поток осветительной установки, лм;  
 $N_{\text{св}}$  – количество светильников, шт;  
 $\Phi_{\text{л}}$  – световой поток одной лампы, лм;  
 $n$  – количество ламп в светильнике, шт.

Количество светильников  $N_{\text{св}}$  (шт) рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{св}} = \frac{E_{\text{н}} \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{\Phi_{\text{л}} \cdot n \cdot \eta}, \quad (1.1)$$

где  $E_{\text{н}}$  – нормативное значение освещенности, определяемое по табл. 1.1, лк;

$S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;

$k_3$  – коэффициент запаса (табл. 1.4), учитывающий снижение освещенности в процессе эксплуатации ламп (зависит от: состояния воздушной среды помещения, старения источника света, частоты чисток светильников и др.);

$z$  – коэффициент минимальной освещенности,  $z = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{мин}}}$ . Для

ламп накаливания, газоразрядных ламп высокого давления и светодиодных ламп рекомендуется принимать  $z = 1,15$ ; для газоразрядных ламп низкого давления  $z = 1,1$ ;

$\Phi_{\text{л}}$  – световой поток одной лампы (табл. 1.2), лм;

$n$  – количество ламп в одном светильнике, шт;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока, определяемый по табл. 1.5, в зависимости от коэффициента отражения светового потока стенами  $\rho_c$  и потолка  $\rho_n$  (табл. 1.6) и индекса помещения  $i$ .

Таблица 1.4

**Коэффициент запаса  $k_z$**

Содержание вредных выделений в рабочей зоне	Коэффициент запаса $k_z$ для ламп	
	газоразрядных и светодиодных	накаливания
Пыль, дым, копоть: свыше 5 мг/м <sup>3</sup>	2,0	1,7
1...5 мг/м <sup>3</sup>	1,8	1,5
менее 1 мг/м <sup>3</sup>	1,5	1,3
Значительные концентрации паров кислот, щелочей и газов	1,8	1,5

Индекс помещения  $i$ , характеризующий влияние относительных размеров освещаемого помещения и коэффициентов отражения на величину коэффициента использования светового потока, определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{(A + B) \cdot H_{св}}, \quad (1.2)$$

где  $A$  – длина помещения, м;

$B$  – ширина помещения, м;

$H_{св}$  – высота подвеса светильников над рабочей поверхностью (рис. 1.1), м.

Суммарная мощность осветительной установки  $P_{о.у.}$  (Вт) определяется:

$$P_{о.у.} = P_{л} \cdot N_{св} \cdot n, \quad (1.3)$$

где  $P_{л}$  – электрическая мощность одной лампы (табл. 1.2), Вт;

$N_{св}$  – количество светильников, шт;

$n$  – количество ламп в одном светильнике, шт.



Таблица 1.5

**Определение коэффициентов использования светового потока  $\eta$**

Светильник	РСП12		РСП38М		ЖСП01		ГСП17		НСП17			
	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
$\rho_n$	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3
$\rho_e$	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3
$i$	Коэффициент использования светового потока $\eta$											
0,6	0,36	0,30	0,28	0,25	0,22	0,45	0,42	0,40	0,35	0,32	0,29	0,47
0,8	0,42	0,38	0,38	0,35	0,31	0,29	0,52	0,49	0,44	0,40	0,40	0,54
1	0,52	0,46	0,45	0,42	0,36	0,60	0,58	0,55	0,53	0,49	0,46	0,60
1,5	0,59	0,53	0,52	0,48	0,44	0,67	0,62	0,58	0,60	0,54	0,53	0,67
2	0,65	0,61	0,58	0,56	0,51	0,49	0,70	0,66	0,62	0,67	0,60	0,70
3	0,66	0,64	0,60	0,58	0,55	0,53	0,72	0,68	0,64	0,69	0,62	0,72
4	0,67	0,64	0,63	0,59	0,56	0,54	0,71	0,69	0,65	0,70	0,66	0,71
5	0,68	0,66	0,65	0,60	0,58	0,56	0,72	0,71	0,65	0,71	0,67	0,72
<b>светильник</b>	<b>ПВ.ЛМ</b>	<b>ЛПО 46</b>		<b>ЛСП 22</b>		<b>ЛСП 44</b>		<b>НПП 03</b>				
$\rho_n$	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
$\rho_e$	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,1
$i$	Коэффициент использования светового потока $\eta$											
0,6	0,38	0,22	0,20	0,36	0,28	0,30	0,27	0,18	0,16	0,35	0,24	0,18
0,8	0,39	0,28	0,30	0,42	0,34	0,36	0,34	0,23	0,24	0,49	0,36	0,29
1	0,46	0,35	0,34	0,46	0,42	0,40	0,41	0,28	0,28	0,54	0,41	0,34
1,5	0,57	0,45	0,43	0,56	0,49	0,48	0,49	0,36	0,38	0,64	0,49	0,42
2	0,69	0,51	0,50	0,59	0,53	0,52	0,58	0,46	0,42	0,73	0,56	0,48
3	0,80	0,65	0,58	0,65	0,56	0,55	0,68	0,53	0,51	0,83	0,65	0,58
4	0,82	0,72	0,61	0,65	0,59	0,59	0,72	0,61	0,55	0,91	0,72	0,65
5	0,85	0,72	0,65	0,68	0,61	0,59	0,78	0,61	0,55	0,95	0,75	0,69

В случае, когда значения индекса помещения  $i$  больше 5, коэффициент использования светового потока  $\eta$  определяют при значении индекса равного 5.

Значения коэффициентов отражения потолка и стен [3]

Состояние потолка	$\rho_n$	Состояние стен	$\rho_c$
свежепобеленный	0,7	свежепобеленные с окнами, закрытыми белыми шторами	0,7
побеленный, в сырых помещениях; чистый бетонный; светлый деревянный (окрашенный)	0,5	свежепобеленные с окнами без штор	0,5
бетонный грязный; деревянный неокрашенный	0,3	бетонные с окнами; оклеенные светлыми обоями	0,3
грязный (кузницы, склады)	0,1	грязные; кирпичные неоштукатуренные; с темными обоями	0,1

**Задача 1.1.** Определить количество светильников и общую мощность осветительной установки, обеспечивающей необходимую освещенность в помещении, характеристика которого приведена в табл. 1.7. Начертить схему размещения светильников в помещении.

*Алгоритм расчета по методу  
коэффициента использования светового потока*

1. Установить нормативное значение освещенности  $E_n$  (лк) по разряду и, при необходимости, подразряду зрительной работы (табл. 1.1).

2. Определить коэффициент запаса  $k_z$  по табл. 1.4 в зависимости от содержания вредных выделений в рабочей зоне и типа источника света.

3. Определить световой поток лампы  $\Phi_l$  (лм) по табл. 1.2.

4. Определить индекс помещения  $i$  по формуле (1.2) с учетом геометрических размеров производственного помещения и высоты подвеса светильников над рабочей поверхностью.

5. Установить значения коэффициентов отражения  $\rho_c$  и  $\rho_n$  в зависимости от состояния стен и потолка по табл. 1.6.

6. Найти коэффициент использования светового потока  $\eta$  по табл. 1.5 с учетом типа светильника, коэффициентов отражения  $\rho_c$  и  $\rho_n$  и индекса помещения  $i$ .

7. Определить количество светильников, которые необходимо разместить в производственном помещении,  $N_{св}$  (шт) по формуле (1.1) с учетом площади освещаемого помещения  $S$  ( $m^2$ ) и коэффициента минимальной освещенности  $z$ .

Таблица 1.7

## Варианты исходных данных к задаче 1.1

№ вар.	Характеристика воздушной среды производственного помещения	A, м	B, м	H <sub>св.</sub> , м	Потолок	Стены	Разряд зрительной работы	Тип светильника	Тип лампы и мощность	n, шт
1	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	18	30	15	бетонный грязный	бетонные с окнами	VII	РСП 12	ДРЛ 700	1
2	1...5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	24	2,6	чистый бетонный	бетонные с окнами	IVб	ЛСП 44	ЛБ 65	2
3	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	24	24	10,8	свежепобеленный	свежепобеленный с окнами без штор	VII	ГСП 17	ДРИ 400	1
4	менее 1 мг/м <sup>3</sup>	6	4	2,6	свежепобеленный	свежепобеленный с окнами без штор	VI	НПП 03	Б 75	1
5	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	18	24	9,6	бетонный грязный	бетонные с окнами	VII	РСП 12	ДРЛ 400	1
6	менее 1 мг/м <sup>3</sup>	6	12	2,6	чистый бетонный	бетонные с окнами	IIIг	РСП 38М	ЛМС-30	1
7	1...5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	4	4	2,6	светлый деревянный	бетонные с окнами	IIIг	НСП 17	Б 60	1
8	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	24	12,6	чистый бетонный	бетонные с окнами	VII	ЖСП 01	ДНаТ 150	1
9	1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	12	3,2	чистый бетонный	оклеенные светлыми обоями	Iг	ЛСП 44	ЛБ 65	2
10	значительные концентрации паров кислот, щелочей, газов	12	30	7,2	бетонный грязный	бетонные с окнами	IVб	РСП 12	ДРЛ 400	1
11	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	18	24	12,6	бетонный грязный	бетонные с окнами	Vб	ГСП 17	ДРИ 400	1
12	1...5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	36	24	3,2	побеленный, в сырых помещениях	бетонные с окнами	IIIг	ЛСП 44	ЛБ 80	2

Окончание табл. 1.7

№ вар.	Характеристика воздушной среды производственного помещения	A, м	B, м	H <sub>св.</sub> , м	Потолок	Стены	Разряд зрительной работы	Тип светильника	Тип и мощность лампы	n, шт
13	1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	6	4	2,6	свежепобеленный	свежепобеленные без штор	IVб	НСП 17	Б 75	1
14	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	24	3,2	бетонный грязный	оклеенные светлыми обоями	VII	ЛСП 22	ЛД 65	2
15	1...5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	36	7,2	чистый бетонный	бетонные с окнами	Vб	ЖСП 01	ДНаТ 100	1
16	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	30	10,8	бетонный грязный	бетонные с окнами	IIIв	РСП 12	ДРЛ 700	1
17	значительные концентрации паров кислот, щелочей, газов	24	24	12,6	бетонный грязный	бетонные с окнами	VII	ГСП 17	ДРИ 7800	1
18	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	24	36	12,6	свежепобеленный	свежепобеленные без штор	IVб	ЖСП 01	ДНаТ 400	1
19	1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	6	3,2	побеленный, в сырых помещениях	бетонные с окнами	VI	НСП 17	ЛМС-30	1
20	значительные концентрации паров кислот, щелочей, газов	6	18	2,6	чистый бетонный	бетонные с окнами	IIIг	ПВЛМ	ЛД 40	2
21	менее 1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	12	30	2,6	чистый бетонный	бетонные с окнами	IVб	ЛСП 22	ЛБ 65	2
22	свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	5	8	3,2	побеленный, в сырых помещениях	бетонные с окнами	Vб	ЛПО 46	ЛБ 18	4
23	значительные концентрации паров кислот, щелочей, газов	36	72	10,8	бетонный грязный	бетонные с окнами	Vа	ГСП 17	ДНаТ 400	1
24	менее 1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	6	12	2,6	свежепобеленный	свежепобеленные без штор	IIIв	ЛСП 22	Т10-20	2
25	1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	6	6	2,6	свежепобеленный	свежепобеленные без штор	IIIг	ЛПО 46	ЛБ 18	4

8. Начертить схему расположения светильников в производственном помещении с учетом габаритных размеров светильников (табл. 1.3), добавляя при необходимости светильники для удобства монтажа осветительной установки. Установить расстояния между светильниками  $L_a$  (м) и  $L_b$  (м) (см. рис. 1.1), а также расстояния от крайних светильников до стен помещения.

9. Рассчитать суммарную мощность осветительной установки  $P_{о.у.}$  (Вт) по формуле (1.3).

### 1.6. Расчет искусственного освещения точечным методом

Теоретически освещенность в любой точке на рабочей поверхности  $E$  (лк), освещаемой источником света, можно рассчитать следующим образом:

$$E = \frac{I_{\alpha} \cdot \cos \alpha}{l^2}, \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  – угол между нормалью к рабочей поверхности и направлением силы света от источника, град.;

$I_{\alpha}$  – сила света в направлении  $\alpha$  от источника в заданную точку рабочей поверхности, кд;

$l$  – расстояние от источника света до расчетной точки, м.

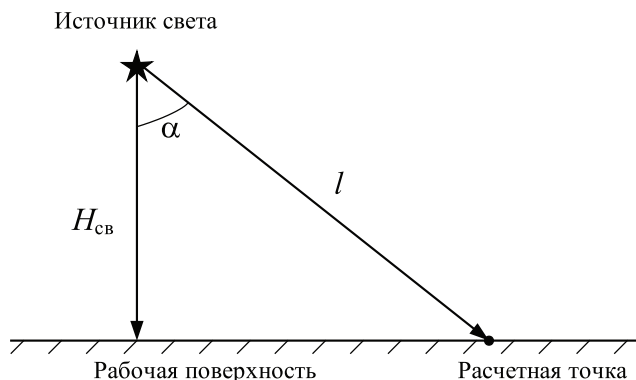


Рис. 1.2. Расположение расчетной точки относительно источника света

На практике использование формулы (1.4) затруднено, так как пространственное распределение силы света зависит от типа и светового потока лампы, конструкции осветительной установки, и прочих условий.

Используя табличные значения силы света, рассчитанные для светильников с условной лампой, обладающей световым потоком 1000 лм, искомую освещенность в заданной точке  $E$  (лк) можно вычислить по формуле:

$$E = \frac{I_{\alpha}^{\text{усл}} \cdot \cos^3 \alpha \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot n}{1000 \cdot k_3 \cdot H_{\text{св}}^2}, \quad (1.5)$$

где  $I_{\alpha}^{\text{усл}}$  – сила света в направлении  $\alpha$  (град.) от источника с условной лампой со световым потоком в 1000 лм в заданную точку рабочей поверхности (табл. 1.8), кд;

$\alpha$  – угол между нормалью к рабочей поверхности и направлением силы света от источника, град.;

$\Phi_{\text{л}}$  – световой поток одной лампы (табл. 1.2), лм;

$n$  – количество ламп в одном светильнике, шт.;

$k_3$  – коэффициент запаса, определяемый по табл. 1.4;

$H_{\text{св}}$  – высота подвеса светильников над рабочей поверхностью, м.

Таблица 1.8

**Значения силы света, характерные  
для отдельных групп светильников с  $\Phi_{\text{л}}=1000$  лм**

$\alpha$ , град	Группы светильников			
	ЛСП 44	НПП 03, РСР 38М, ЛСП 22, ПВЛМ, ЛПО 46	РСР 12, ГСП 17	НСР 17, ЖСП 01
	$I_{\alpha}^{\text{усл}}$ , кд			
0	159,2	330,0	800,0	2400,0
5	159,2	328,7	791,7	2323,0
10	159,2	325,0	767,1	2097,0
15	159,2	318,8	726,5	1737,0
20	159,2	310,1	670,9	1265,0
25	159,2	299,1	601,5	712,0
30	159,2	285,8	519,6	113,0
35	159,2	270,3	426,9	0
40	159,2	252,8	325,4	–
45	159,2	233,3	217,2	–
50	159,2	212,1	104,4	–
55	159,2	189,3	0	–
60	159,2	165,0	–	–
65	159,2	139,5	–	–
70	159,2	112,9	–	–
75	159,2	85,4	–	–
80	159,2	57,3	–	–
85	159,2	28,7	–	–
90	159,2	0	–	–

**Задача 1.2.** На основании результатов задачи 1.1. рассчитать освещенность в двух точках: в точке, расположенной непосредственно под светильником, и в точке, расположенной между светильниками. Убедиться, что освещенность, создаваемая светильниками, в указанных точках не меньше нормативной.

### *Алгоритм расчета по точечному методу*

1. Выбрать точку (расчетная точка) на рабочей поверхности, в которой необходимо определить освещенность.

2. На основании данных о размещении светильников (схема расположения светильников, высота подвеса) определить угол  $\alpha$  (град.) между нормалью к рабочей поверхности и направлением силы света от ближайшего светильника в расчетную точку (рис. 1.2).

3. Определить силу света в направлении  $\alpha$  (град.) от светильника в расчетную точку рабочей поверхности  $I_{\alpha}^{усл}$  (кд) по табл. 1.8.

4. Определить в расчетной точке освещенность, создаваемую светильником,  $E$  (лк) с учетом коэффициента запаса  $k_3$ , светового потока светильника  $\Phi_{л} \cdot n$  (лм) и высоты подвеса светильников  $H_{св}$  (м) по формуле (1.5).

5. Сравнить полученное значение освещенности с нормативным. В случае, если рассчитанная освещенность меньше установленной СП 52.13330.2011 [1], произвести расчет освещенности, создаваемой в расчетной точке следующим по удаленности светильником. Расчет освещенности в расчетной точке следует проводить до тех пор, пока освещенность не будет соответствовать нормативной или не превысит ее. При этом необходимо учесть, что если поверхность освещается несколькими светильниками, то общая освещенность в расчетной точке  $E$  находится как сумма освещенностей, создаваемых этими светильниками:

$$E = \sum_i^m E_i, \quad (1.6)$$

где  $E_i$  – освещенность в расчетной точке, создаваемая  $i$ -м светильником, лк;

$m$  – количество светильников, обеспечивающих освещенность в расчетной точке, шт.

## **Библиографический список**

1. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95». – М.: ОАО «ЦПП», 2011.

2. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. №261–ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» / Российская газета, №5050 от 27 ноября 2009.

3. Пособие «Расчет и проектирование искусственного освещения помещений общественных зданий» к МГСН 2.06–99 «Естественное, искусственное и совмещенное освещение». – М.: Москомархитектура, 1999.



## 2. РАСЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОБЩЕОБМЕННОЙ И МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

### 2.1. Основные понятия и определения

**Вентиляция** – обмен воздуха в помещениях для удаления избытков теплоты, влаги, вредных и других веществ с целью обеспечения допустимых метеорологических условий и чистоты воздуха в обслуживаемой или рабочей зоне.

Требования санитарной, экологической и пожарной безопасности, надежности и энергосбережения к системам вентиляции воздуха зданий и сооружений установлены в СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Актуализированная редакция СНиП 41–01–2003» [1].

По месту действия вентиляцию выполняют *общеобменной* и *местной*.

**Общеобменная** или **общая** вентиляция предусматривает воздухообмен во всем объеме помещения.

Для удаления загрязненного воздуха непосредственно от источников образования вредных выделений применяют **местную вытяжную вентиляцию**.

К устройствам *местной вытяжной вентиляции* относят: вытяжные шкафы, укрытия, вытяжные зонты, бортовые отсосы и т.п.

Устройства местной вытяжной вентиляции располагают на пути распространения потока вредных выделений. Так как эффективность работы местной вытяжной вентиляции обратно пропорциональна расстоянию от источника выделения вредностей до отверстия всасывания, вытяжные устройства должны быть максимально приближены к источнику вредного выделения, чтобы обеспечить их максимальное улавливание.

Общеобменная и местная вентиляция по способу перемещения воздуха может быть *естественной* или *механической*.

### 2.2. Расчет естественной общеобменной вентиляции

В жилых, административных и офисных зданиях (в помещениях небольшого объема) наиболее часто устраивают естественную вентиляцию через специально предусмотренные вентиляционные каналы или шахты. Для повышения эффективности работы такой вентиляции

на верхнем конце наружной части вытяжных каналов монтируют дефлекторы, предназначенные для увеличения пропускной способности вытяжных шахт за счет использования ветрового напора.

Естественная вентиляция помещений происходит вследствие разности давлений внутри и снаружи помещения. Температура воздуха внутри здания за счет тепловыделений (от оборудования, людей, источников искусственного освещения и др.), как правило, выше температуры наружного воздуха, что и обеспечивает разницу плотностей (давлений).

Общеобменная вентиляция характеризуется кратностью воздухообмена  $K$ , ч<sup>-1</sup>:

$$K = \frac{L}{V}, \quad (2.1)$$

где  $L$  – расход воздуха, удаляемый или подаваемый в помещение, м<sup>3</sup>/ч;  
 $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>.

Кратность воздухообмена показывает, сколько раз в час меняется воздух в помещении. Для жилых помещений рекомендуемая кратность воздухообмена составляет около 1, для офисных помещений – 2...3, для бытовых помещений промышленных предприятий и вспомогательных помещений – 5...10, для цехов промышленных предприятий – свыше 10.

Для определения расхода воздуха  $L$  (м<sup>3</sup>/с) необходимо иметь данные о количестве теплоты, выделяемой в помещении (см. табл. 2.1 и 2.2).

Таблица 2.1

**Количество теплоты, выделяемой человеком при различных видах деятельности [2]**

Физическая нагрузка	Интенсивность труда, Вт	Количество выделяющейся теплоты, Вт при температуре в помещении				
		20 °С	22 °С	25 °С	30 °С	35 °С
покой	100	70,0	65,2	58,0	40,7	5,8
легкая	200	75,6	71,0	64,0	40,7	6,5
средней тяжести	350	81,4	76,8	70,0	40,7	8,5
тяжелая	490	104,7	100,0	93,0	53,3	11,6

Средние тепловыделения офисной техники [2]

Оборудование	Непрерывная работа или постоянное включение, Вт	Спящий режим, Вт
Системный блок (мощность 391 Вт)	55,6	20
Монитор		
13...15 дюймов	55	0
16...18 дюймов	70	0
19...20 дюймов	80	0
Лазерный принтер:		
Настольный	215	35
Большой офисный	550	125
Копировальный аппарат:		
Настольный	400	20
Офисный	1100	300
Факс	30	15
Сканер	25	15

Расход подаваемого (удаляемого) воздуха  $L$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), который может отвести избыточную теплоту, равен

$$L = \frac{\sum_i^n (N_i^{\text{чел}} \cdot Q_i^{\text{чел}}) + \sum_j^m (N_j^{\text{об}} \cdot Q_j^{\text{об}})}{C^{\text{в}} \cdot (T_{\text{ух}}^{\text{в}} - T_{\text{пост}}^{\text{в}})}, \quad (2.2)$$

где  $n, N_i^{\text{чел}}$  – число групп людей, выполняющих работу одной категории по тяжести, и количество людей в  $i$ -той группе соответственно;  
 $m, N_j^{\text{об}}$  – число групп оборудования с одинаковым тепловыделением и количество оборудования в  $j$ -той группе соответственно;  
 $Q_i^{\text{чел}}, Q_j^{\text{об}}$  – количество теплоты, выделяемой человеком и оборудованием, в единицу времени, Вт;  
 $C^{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воздуха, принимаемая равной  $1300 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  
 $T_{\text{ух}}^{\text{в}}$  – температура уходящего воздуха, принимаемая равной на  $3$  градуса выше температуры воздуха в помещении (в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88 [3]), К;  
 $T_{\text{пост}}^{\text{в}}$  – температура поступающего воздуха, принимаемая равной температуре на улице, К.

Фактический расход воздуха  $L_{\text{факт}}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) будет зависеть от целого ряда параметров и может быть определен по формуле:

$$L_{\text{факт}} = \mu \cdot F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot \left[ \rho_0^B \cdot \frac{T_0^B}{T_{\text{пост}}^B} - \rho_0^B \cdot \frac{T_0^B}{T_{\text{ух}}^B} \right]}{\rho_0^B \cdot \left[ \frac{(T_{\text{ух}}^B + T_{\text{пост}}^B)}{2T_0^B} \right]^{-1}}}, \quad (2.3)$$

где  $\rho_0^B = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при температуре  $T_0^B = 273 \text{ К}$ ;  
 $h$  – разность высот расположения приточного и вытяжного отверстий, м;

$F$  – площадь отверстия для прохода воздуха,  $\text{м}^2$ ;

$\mu$  – коэффициент расхода, зависящий от положения открытия жалюзи вытяжного отверстия, равный 0,33 при угле раскрытия жалюзи  $30^\circ$ ; 0,60 – при угле раскрытия  $45^\circ$  и 0,8 – при  $90^\circ$ .

**Задача 2.1.** В компьютерном классе объемом  $A \times B \times H$  ( $\text{м}^3$ ) установлено  $N$  компьютеров (системный блок и монитор, размером  $D$  дюймов, при постоянном включении). За каждым компьютером работает один оператор (физическая нагрузка – легкая). Также в помещении находятся: настольный лазерный принтер, сканер, факс и офисный копировальный аппарат (см. табл. 2.3) в спящем режиме. Принимая, что оптимальным условиям работы оператора соответствует температура  $22^\circ\text{C}$ , определить: необходимую производительность (расход) приточно-вытяжной естественной вентиляции, площадь вытяжных проемов и кратность воздухообмена. Перепад высот приточного (окно) и вытяжного (решетка с жалюзи) отверстий принять 1 м.

Таблица 2.3

Варианты исходных данных к задаче 2.1

№ варианта	$A$ , м	$B$ , м	$H$ , м	$N$ , шт	$D$ , дюйм	$T_{\text{пост}}^B$ , $^\circ\text{C}$	Угол раскрытия жалюзи, град.
1	4	10	4	3	13	18	30
2	4,5	8	3,5	3	14	17	45
3	5	8	3,5	4	15	15	90
4	4	6	4	3	16	12	30
5	5	10	4,5	4	17	18	45
6	6	8	4	6	18	15	90
7	5,5	5	4,2	4	19	15	30
8	5	4	4	3	20	16	45
9	10	5	4,5	6	13	17	90
10	5	6	4	4	14	16	30

№ варианта	A, м	B, м	H, м	N, шт	D, дюйм	$T_{\text{пост}}^{\text{в}}$ , °С	Угол раскрытия жалюзи, град.
11	5	6	3,5	5	15	12	45
12	4,5	5	4	3	16	16	90
13	9	6	4,5	3	17	20	30
14	6	7	4	3	18	19	45
15	8	4	4	4	19	15	90
16	4	6	3,5	4	20	14	30
17	4,5	5,5	4	3	13	15	45
18	5	8	4,2	3	14	20	90
19	4	6	4,5	4	15	14	30
20	10	5	4	5	16	18	45
21	10	4	3,2	5	17	11	90
22	5	5	2,7	2	18	12	30
23	4	5	3	1	19	15	45
24	6	10	4	8	20	14	90
25	8,5	4	4,5	6	13	13	30

### ***Алгоритм расчета общеобменной вентиляции***

1. Для заданного помещения в соответствии с табл. 2.1 и 2.2 определить тепловыделения в помещении.
2. Рассчитать необходимый расход воздуха по формуле (2.2), который обеспечит удаление избыточной теплоты.
3. Определить площадь вытяжных проемов, которая обеспечит требуемый расход воздуха, по формуле (2.3).
4. Определить кратность воздухообмена по формуле (2.1) и сравнить полученное значение с рекомендуемым для данного типа помещения.

## **2.3. Расчет местной вытяжной вентиляции**

### **2.3.1. Расчет бортовых отсосов**

Бортовые отсосы устанавливают главным образом у производственных ванн, представляющих собой открытые резервуары, чаще всего четырехугольной формы, наполненные разного рода растворами. Вредные выделения из производственных ванн могут выделяться в виде паров кислот, щелочей и различных газов.

Наиболее действенным методом защиты персонала от вредных выделений является полное укрытие ванны. Однако по технологическим соображениям это возможно крайне редко. Большое распространение получили отсосы по бортам ванны в виде сплошной щели, называемой бортовым отсосом.

Принцип работы бортового отсоса состоит в том, что всасываемый с большой скоростью через узкую заборную щель отсоса воздух образует над зеркалом раствора сильную горизонтальную струю, которая сбивает с вертикального пути выбрасываемые из раствора газы и капли и этим заставляет основную массу капель упасть обратно в ванну, а газы и остальные капли увлекаются в отсос.

Горизонтальная струя бортового отсоса быстро ослабевает с удалением от заборной щели, поэтому однобортный отсос делают только при ширине ванны не более 600 мм. На более широких ваннах устанавливают отсосы с двух противоположных сторон ванны (двубортные).

В зависимости от типа ванн применяют местные отсосы с щелью всасывания в горизонтальной плоскости (*опрокинутые*) и в вертикальной плоскости (*простые* или *обычные*), кроме того используются бортовые отсосы с *передувкой* (рис. 2.1). Обычные отсосы применяют если уровень жидкости находится ниже верхнего уровня борта ванны на 80...150 мм. При более низком уровне жидкости, а также при подвижности воздуха в помещении свыше 0,4 м/с рекомендуется использовать опрокинутые бортовые отсосы. При прочих равных условиях они наиболее эффективны, требуют значительно меньшего расхода воздуха по сравнению с обычными. В качестве недостатка опрокинутых бортовых отсосов можно отметить возможное затенение ими части зеркала ванны. Бортовые отсосы с передувкой могут существенно (почти в три раза) сократить необходимый объем воздуха по сравнению с бортовыми отсосами без передувки. Однако отсосы с передувками находят ограниченное применение, так как в случае нарушения требуемого соотношения между объемами подаваемого и удаляемого воздуха приточная струя может способствовать раздуванию вредных веществ в помещении.

Бортовые отсосы располагают по длинным сторонам ванн.

Расход воздуха, удаляемого бортовыми отсосами без передувки с щелью всасывания в горизонтальной или вертикальной плоскости, следует определять по формуле:

$$L = 1400 \cdot \left( 0,53 \cdot \frac{b \cdot l}{b + l} + h \right)^{1/3} \cdot b \cdot l \cdot k_{\Delta T} \cdot k_T \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad (2.4)$$

где  $L$  – расход воздуха, удаляемого бортовыми отсосами, м<sup>3</sup>/ч;

$b$  – внутренняя ширина ванны, м;

$l$  – внутренняя длина ванны, м;

$h$  – расстояние от зеркала раствора до борта ванны, м;

$k_{\Delta T}$  – коэффициент, учитывающий разность температур раствора

в ванне  $t_b$  и воздуха в помещении  $t_{п}$  (табл. 2.4);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий токсичность и интенсивность выделения вредных веществ (табл. 2.5);

$k_1$  – коэффициент, учитывающий тип отсоса ( $k_1 = 1$  для двухбортового;  $k_1 = 1,8$  для однобортового);

$k_2$  – коэффициент, учитывающий воздушные перемешивания раствора ( $k_2 = 1$  без перемешивания; при наличии барботажа  $k_2 = 1,2$ );

$k_3$  – коэффициент, учитывающий укрытие зеркала раствора поплавками (в отсутствии  $k_3 = 1$ , при укрытии шариками  $k_3 = 0,75$ );

$k_4$  – коэффициент, учитывающий укрытие зеркала пенным слоем, путем введения добавок – поверхностно активных веществ (ПАВ) (в отсутствии  $k_4 = 1$ , при наличии  $k_4 = 0,5$ ).

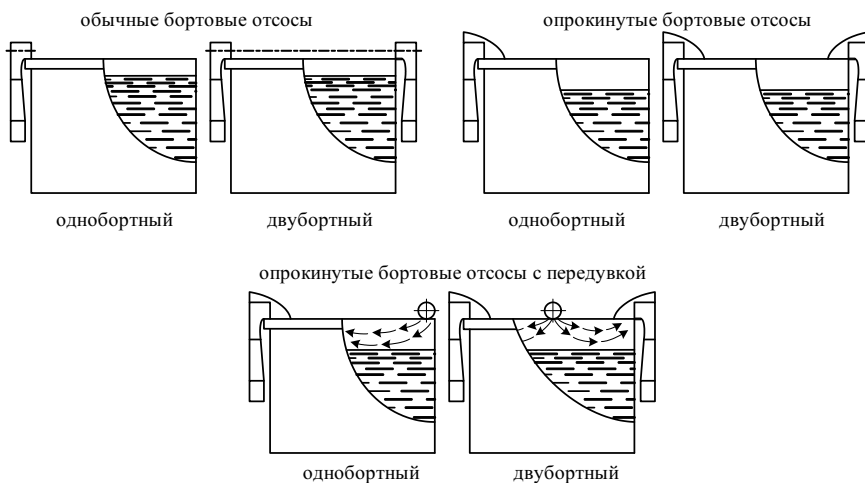


Рис 2.1. Схемы бортовых отсосов

Таблица 2.4

**Коэффициент учета разности температур раствора и воздуха в помещении**

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$k_{\Delta t}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$k_{\Delta t}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$k_{\Delta t}$
0	1,00	30	1,47	60	1,94
5	1,03	35	1,55	65	2,02
10	1,16	40	1,63	70	2,10
15	1,24	45	1,71	75	2,18
20	1,31	50	1,79	80	2,26
25	1,39	55	1,86	–	–

**Коэффициент учета токсичности  
и интенсивности выделения вредных веществ**

Группа ванн	1	2	3	4	5
$k_T$	2,00	1,60	1,25	1,00	0,50

**Соответствие групп ванн технологическим процессам**

Технологический процесс	Группа ванн
Никелирование в хлоридных растворах при плотности тока свыше 1 А/дм <sup>2</sup>	1
Электрохимическая обработка металлов в растворах, содержащих хромовую кислоту в концентрации 150...350 г/л, при силе тока более 1000 А (хромирование, анодное активирование, снятие меди и др.)	
Электрохимическая обработка металлов в растворах, содержащих хромовую кислоту в концентрации 30...60 г/л (электрополирование алюминия, стали и др.)	2
Электрохимическая обработка в растворах щелочи (анодное снятие шлама, обезжиривание, лужение, цинкование в щелочных электролитах, снятие олова, оксидирование меди, снятие хрома и др.)	
Кадмирование, серебрение, золочение цинкование, меднение и латунирование в цианистых растворах	
Электрохимическая обработка металлов в растворах, содержащих серную кислоту в концентрации 150...350 г/л, а также химическая обработка в концентрированных холодных и разбавленных нагретых растворах (анодирование, травление и др.)	3
Химическая обработка металлов в концентрированных холодных и разбавленных нагретых растворах, содержащих соляную кислоту (травление, снятие шламов и др.) или ортофосфорную кислоту (фосфатирование и др.)	
Электрохимическая обработка металлов в растворах, содержащих хромовую кислоту в концентрации 30...100 г/л, при силе тока менее 500 А (анодирование алюминия и магниевых сплавов и др.), а также химическое оксидирование алюминия и магния	4
Химическая обработка стали в растворах хромовой кислоты и ее солей при $t \geq 50$ °С (пассивация, травление, снятие оксидной пленки и др.)	
Меднение в этилендиаминовом электролите	
Кадмирование и лужение в кислых электролитах с добавкой фенола	
Крашение в анилиновом красителе	



Технологический процесс	Группа ванн
Химическая обработка металлов в растворах хромовой кислоты и ее солей при $t < 50$ °С (осветление, пассивация и др.)	5
Химическая обработка металлов, кроме снятия цинкового и кадмиевого покрытия, в холодных растворах, содержащих соляную кислоту в концентрации до 200 г/л	
Меднение, лужение, цинкование и кадмирование в серноокислых растворах при $t < 50$ °С, а также химическая активация	
Промывка в горячей воде	

### 2.3.2. Расчет вытяжного шкафа

Методика расчета вытяжных шкафов определяется наличием или отсутствием в них тепловых потоков и сводится к определению расхода воздуха и кратности воздухообмена в вытяжном шкафу. Важным параметром является также скорость подсоса воздуха в рабочем (открытом) проеме. Чем вреднее вещество, тем больше должна быть скорость воздуха в открытом проеме и кратность воздухообмена.

Исходя из рассчитанного расхода воздуха, выбирают вентилятор и определяют мощность электродвигателя к нему.

Расход удаляемого воздуха  $L_T$  (м<sup>3</sup>/ч) при наличии в вытяжном шкафу тепловых потоков определяют по формуле:

$$L_T = 1150 \cdot \sqrt[3]{h_1 \cdot Q \cdot F^2}, \quad (2.5)$$

где  $h_1$  – высота открытого проема вытяжного шкафа (отверстия), м;  
 $Q$  – количество теплоты, поглощаемой воздухом внутри шкафа в единицу времени, Вт;  
 $F$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>.

Расход удаляемого воздуха  $L_B$  (м<sup>3</sup>/ч) при отсутствии в вытяжном шкафу тепловых выделений определяют по скорости его движения в открытом проеме по формуле:

$$L_B = 3600 \cdot F \cdot v, \quad (2.6)$$

где  $v$  – скорость движения воздуха в открытом проеме, м/с.

При наличии в помещении и тепловых выделений и вредных веществ расход удаляемого воздуха определяют независимо для тепла и для вредных веществ, затем выбирают из них максимальное значение и расчет проводят по нему ( $\max(L_T, L_B)$ ).

Скорость движения воздуха в открытом проеме (подсос воздуха) определяют в зависимости от рода операций и характера воздействия вредных веществ на человека, или же в зависимости от предельно допустимой концентрации (ПДК) газов, паров, пыли и др. веществ, с которыми проводится работа в вытяжном шкафу, по справочным данным (табл. 2.7 и 2.8).

Таблица 2.7

**ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны [3,4]**

Вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Агрегатное состояние
Азота окислы (в пересчете на NO <sub>2</sub> )	5	2	п
Бензин	100	4	п
Бензол	15	2	п
Водорода хлорид (соляная кислота)	5	2	п
Водорода цианид (синильная кислота)	0,3	1	п
Кадмия окись	0,1	1	а
Кислота азотная+	2	3	а
Кислота серная+	1	2	а
Марганец	0,3	2	а
Медь	1	2	а
Мышьяковый и мышьяковистый ангидрид	0,3	2	а
Мышьяковистый водород	0,3	2	п
Натрия нитрат (натриевая селитра)	5	3	а
Никель и его окись, закись, сульфид (в пересчете на Ni)	0,05	1	а
Никель карбонил	0,0005	1	п
Ртуть металлическая	0,01	1	п
Свинец и его неорганические соединения	0,01	1	а
Сероводород+	10	2	п
Сероуглерод	10	2	п
Уайт-спирит (в пересчете на С)	300	4	п
Угледороды	300	4	п
Углерод окись	20	4	п
Углерод четыреххлористый+	20	2	п
Хромовый ангидрид, хроматы, биоохроматы ( в пересчете на CrO <sub>3</sub> )	0,01	1	а
Цинка окись	6	3	а
Щелочи едкие + (растворы в пересчете на NaOH)	0,5	2	а

Условные обозначения: п – пары и/или газы; а – аэрозоль; + – требуется специальная защита кожи и глаз.

**Скорость подсоса воздуха в вытяжных шкафах  
и кратность воздухообмена для различных вредных веществ**

Группа веществ	ПДК газов или паров, мг/м <sup>3</sup>	Скорость подсоса воздуха $v$ , м/с	Кратность воздухо- обмена $K$ , ч <sup>-1</sup>
I группа			
Ацетон, бензин, спирты (этиловый и бутиловый), эфиры уксусной кислоты и пр.	100...1000	0,35...0,50	150...200
II группа			
Аммиак, бензол, сероуглерод, спирт метиловый, дихлорэ- тан, четыреххлористый углерод и пр.	10...100	0,50...0,75	200...250
III группа			
Анилин, окислы азота, окись цинка, серная кислота, сероводород и пр.	1,0...10	0,75...1,00	250...300
IV группа			
Мышьяк, пары ртути, хлор, сулема, фосфор желтый, цианистый водород и пр.	менее 1,0	1,0...2,0	350...500

Рекомендуется принимать для расчета максимальное значение скорости движения воздуха данной группы вредных веществ в указанном интервале.

*Кратность воздухообмена в вытяжном шкафу:* определяется по формуле (2.1) (где  $L$  – это  $L_{т(в)}$ , м<sup>3</sup>/ч, а  $V$  – объем шкафа, м<sup>3</sup>).

Зная величину  $K$  по табл. 2.8 можно определить с какой группой веществ можно проводить работу.

Расчетная кратность воздухообмена не должна быть меньше приведенной в таблице 2.8.

### 2.3.3. Выбор вентилятора и определение мощности электродвигателя

При выборе вентилятора следует ориентироваться на центробежные вентиляторы низкого давления (до 1000 Па) типа Ц 4 – 70 с коэффициентом полезного действия (КПД) 0,7...0,8. Основные характеристики вентилятора – давление, создаваемое вентилятором  $P$  (Па), количество оборотов в минуту  $n$  (об/мин), КПД и окружную скорость колеса  $v_0$  (м/с) можно определить по номограмме (см. рис. 2.2).

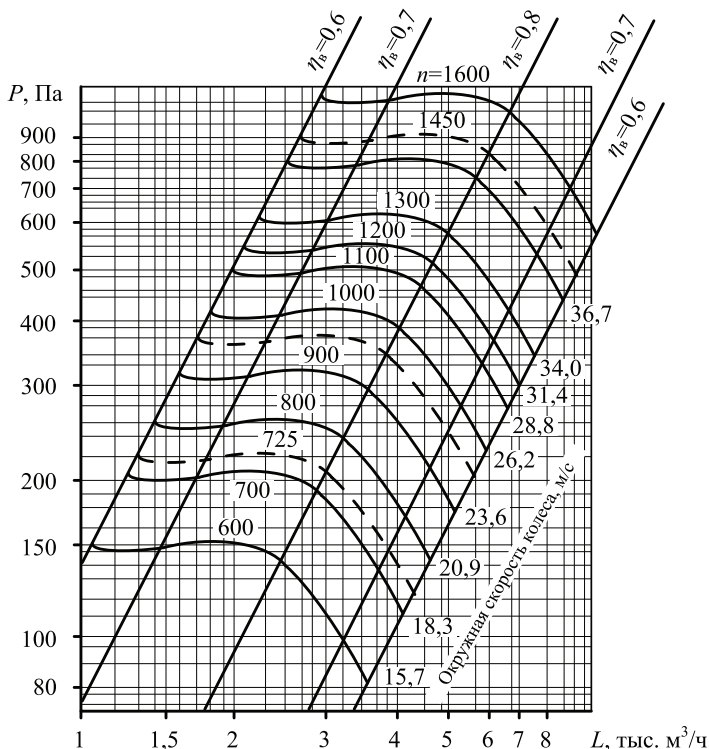


Рис. 2.2. Характеристики вентилятора Ц 4 – 70 №5

*Потребная мощность* на валу электродвигателя  $N$  (кВт) рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{L \cdot P}{3600 \cdot 1020 \cdot \eta_v \cdot \eta_{\text{п}}}, \quad (2.7)$$

где  $L$  – производительность вентилятора (расход),  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$P$  – давление, создаваемое вентилятором, Па;

$\eta_v$  – КПД вентилятора (принимается по характеристике вентилятора);

$\eta_{\text{п}}$  – КПД привода, который при плоскоременной передаче равен 0,9; при клиноременной – 0,95; при непосредственной установке колеса на валу двигателя – 1,0; при присоединении колеса через муфту – 0,98.

Установочная мощность  $N_{уст}$  (кВт) электродвигателя

$$N_{уст} = \alpha \cdot N, \quad (2.8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент запаса мощности (принимается по табл. 2.9).

Таблица 2.9

**Коэффициент запаса мощности вентиляторов**

Мощность на валу электродвигателя, кВт	Коэффициент запаса мощности радиальных вентиляторов
менее 0,5	1,50
0,5...1	1,30
1,01...2	1,20
2,01...5,0	1,15
свыше 5,0	1,10

**Алгоритм выбора вентилятора  
и определения мощности электродвигателя**

1. По рис. 2.2 определить давление  $P$  (Па), создаваемое вентилятором, и режим его работы ( $n$ , об/мин), предварительно определив расход удаляемого вытяжным устройством воздуха и принимая КПД вентилятора 0,7...0,8.

2. Определить потребную мощность электродвигателя к вентилятору  $N$  (кВт) по формуле (2.7).

3. Определить установочную мощность электродвигателя  $N_{уст}$  (кВт) по формуле (2.8).

**Задача 2.2.** Подобрать для ванны обычный бортовой отсос, обеспечивающий удаление вредных выделений от технологического процесса (варианты заданий приведены в табл. 2.10). Установить характеристики вентилятора и определить установочную мощность электродвигателя.

**Алгоритм расчета бортового отсоса**

1. В зависимости от ширины ванны определить тип бортового отсоса (однобортный или двубортный).

2. Выбрать номер группы ванн в соответствии с технологическим процессом (табл. 2.6).

3. Определить расход воздуха, удаляемого бортовым отсосом,  $L$  (м<sup>3</sup>/ч) по формуле (2.4).

4. Определить характеристики вентилятора (рис. 2.2) и рассчитать установочную мощность электродвигателя  $N_{уст}$  (кВт) по формулам (2.7) и (2.8).

Варианты исходных данных к задаче 2.2

№ варианта	$b$ , мм	$l$ , м	$h$ , мм	$t_{вп}$ , °С	$t_{пр}$ , °С	Технологический процесс	$k_2$	$k_3$	$k_4$	Тип передачи
1	750	1,2	200	85	25	снятие меди	1,0	1,00	1,0	плоскоременная
2	750	1,2	200	75	15	электрополирование стали	1,0	0,75	1,0	клиноременная
3	750	1,5	80	80	20	анодирование алюминия хромовой кислотой	1,0	1,00	1,0	непосредственно на валу
4	1000	5,0	80	100	20	пассивация при $t \geq 50$ °С	1,0	0,75	0,5	через муфту
5	1250	5,0	80	95	20	пассивация при $t < 50$ °С	1,0	1,00	1,0	плоскоременная
6	1000	3,5	80	75	20	снятие олова	1,2	0,75	0,5	клиноременная
7	750	1,0	200	80	15	травление в серной кислоте	1,2	1,00	0,5	плоскоременная
8	500	1,0	80	85	25	окислирование магния в растворе хромовой кислоты	1,2	0,75	1,0	через муфту
9	550	1,0	80	100	20	золочение в цианистых растворах	1,0	1,00	1,0	плоскоременная
10	590	1,2	80	95	20	латунирование в цианистых растворах	1,0	0,75	0,5	клиноременная
11	500	1,2	80	75	20	кадмирование в цианистых растворах	1,2	1,00	0,5	непосредственно на валу
12	750	1,5	120	80	15	фосфатирование	1,2	0,75	1,0	через муфту
13	1000	8,0	200	95	25	обработка металлов в соляной кислоте ( $C \leq 200$ г/л)	1,2	1,00	0,5	плоскоременная
14	550	3,0	200	85	25	цинкование в сернохлорном растворе при $t < 50$ °С	1,0	0,75	1,0	клиноременная
15	550	5,0	80	70	15	осветление	1,0	1,00	0,5	плоскоременная
16	590	2,0	80	95	20	окислирование алюминия в растворе хромовой кислоты	1,2	0,75	1,0	через муфту
17	1000	3,0	180	95	20	анодное снятие шлама	1,2	1,00	0,5	плоскоременная

Окончание табл. 2.10

№ варианта	$b$ , мм	$l$ , м	$h$ , мм	$t_p$ , °С	$t_{np}$ , °С	Технологический процесс	$k_2$	$k_3$	$k_4$	Тип передачи
18	1000	3,5	200	100	20	обработка металлов в соляной кислоте ( $C \leq 200$ г/л)	1,2	0,75	0,5	клиноременная
19	500	1,0	80	80	15	никелирование	1,0	0,75	1,0	непосредственно на валу
20	750	1,2	80	95	20	снятие хрома	1,0	1,00	1,0	через муфту
21	500	2,0	80	95	20	кадмирование с добавкой фенола	1,2	1,00	0,5	плоскоремная
22	650	3,0	80	100	25	меднение в этилендиаминовом электролите	1,0	0,75	1,0	клиноременная
23	700	1,5	120	70	15	крашение в анилиновом красителе	1,2	1,00	1,0	непосредственно на валу
24	1250	5,0	200	100	20	промывка в горячей воде	1,2	0,75	0,5	через муфту
25	1000	2,0	200	80	20	травление в серной кислоте	1,2	1,00	0,5	плоскоремная

**Задача 2.3.** В вытяжном шкафу объемом  $l \times b \times h$  ( $\text{м}^3$ ) проводится работа с вредным веществом (см. табл. 2.11). Дверка вытяжного шкафа шириной  $l_1$  ( $\text{м}$ ) открыта на высоту  $h_1$  ( $\text{м}$ ). Определить расход удаляемого воздуха из вытяжного шкафа, кратность воздухообмена, характеристики вентилятора и рассчитать установочную мощность электродвигателя к нему.

#### *Алгоритм расчета вытяжного шкафа*

1. Определить расход удаляемого из вытяжного шкафа воздуха по формулам (2.5) и (2.6). Учесть, что 10 % тепла из шкафа поступает в помещение, а скорость подсоса воздуха зависит от вида вредного вещества (см. табл. 2.8). Выбрать наибольшее значение расхода воздуха для дальнейших расчетов.

2. Определить объем вытяжного шкафа  $V$  ( $\text{м}^3$ ).

3. По формуле (2.1) рассчитать кратность воздухообмена в вытяжном шкафу  $K$ ,  $\text{ч}^{-1}$ .

4. Сопоставить полученное значение кратности воздухообмена с табличным значением (по табл. 2.8). Расчетное значение должно превышать табличное.

5. Определить характеристики вентилятора (рис. 2.2) и рассчитать установочную мощность электродвигателя  $N_{\text{уст}}$  ( $\text{кВт}$ ) по формулам (2.7) и (2.8).

#### **Библиографический список**

1. СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Актуализированная редакция СНиП 41–01–2003». – М.: ОАО ЦПП», 2012 г.

2. Wilkins С.К., Hosni М.Н. Heat gain from office equipment. ASHRAE Journal, 2000 June, p. 33-43.

3. ГОСТ 12.1.005–88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» – М.: ВГУП «Стандартинформ», 2006 г.

4. ГН 2.2.5.1313–03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» – М.: Минздрав России, 2003 г.

5. Справочник проектировщика. Часть III. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Под ред. И.Г. Старовойтова. – М.: Стройиздат, 1978 г. – 510 с.



Таблица 2.11

## Варианты исходных данных к задаче 2.3

№ варианта	Выполняемые операции	Вредное вещество	Тепловыделение от электропечи, Вт	Размеры вытяжного шкафа, м				Размеры открытого проема, м		Тип передачи
				$l$	$b$	$h$	$l_1$	$h_1$		
1	пайка свинцом или сплавами ПОС; термическая обработка в электропечи	аэрозоль свинца	170	2,0	0,90	1,5	0,80	0,65	через муфту	
2	работа с расплавленным свинцом; термическая обработка в электропечи	аэрозоль свинца и оксидов	180	2,1	0,95	1,6	0,85	0,45	плоскоременная	
3	работа со ртутью без нагрева; термическая обработка в электропечи	пары ртути	240	2,2	1,00	1,5	0,90	0,50	клиноременная	
4	обезжиривание в бензоле; термическая обработка в электропечи	пары бензола	800	2,0	0,90	1,5	0,80	0,45	плоскоременная	
5	работа со ртутью при интенсивном движении; термическая обработка в электропечи	пары ртути	120	2,1	0,95	1,6	0,85	0,40	через муфту	
6	промывка в бензине; термическая обработка в электропечи	пары бензина	1000	2,2	1,00	1,5	0,90	0,50	плоскоременная	
7	травление азотной кислотой; термическая обработка в электропечи	пары азотной кислоты	1250	2,0	0,90	1,6	0,80	0,60	клиноременная	
8	травление соляной кислотой; термическая обработка в электропечи	пары соляной кислоты	1600	2,1	0,95	1,5	0,85	0,55	непосредственно на валу	
9	обезжиривание бензином; термическая обработка в электропечи	пары бензина	2100	2,2	1,00	1,6	0,90	0,50	через муфту	
10	хромирование; термическая обработка в электропечи	хромовый ангидрид	170	2,0	0,90	1,5	0,80	0,40	плоскоременная	
11	обезжиривание электролитическое; термическая обработка в электропечи	туман щелочей	150	2,1	0,95	1,6	0,85	0,55	клиноременная	
12	термическая обработка в электропечи	пары бензола	1700	2,0	1,00	1,5	0,85	0,60	плоскоременная	

Окончание табл. 2.11

№ варианта	Выполняемые операции	Вредное вещество	Тепловыделение от электропечи, Вт	Размеры вытяжного шкафа, м			Размеры отверстия проема, м		Тип передачи
				l	b	h	l <sub>1</sub>	h <sub>1</sub>	
13	кадмирование; термическая обработка в электропечи	пары синильной кислоты	200	2,1	0,95	1,6	0,90	0,60	через муфту
14	закалка в селитровой ванне; термическая обработка в электропечи	аэрозоль селитры натриевой	2500	2,0	0,90	1,5	0,90	0,55	плоскоремennая
15	точечная сварка мелких изделий; термическая обработка в электропечи	аэрозоль марганца	190	2,2	1,00	1,6	0,80	0,60	клиноремennая
16	хромирование; термическая обработка в электропечи	хромовый ангидрид	220	2,1	0,90	1,5	0,85	0,35	непосредственно на валу
17	обезжиривание бензином; термическая обработка в электропечи	пары бензина	800	2,2	1,00	1,5	0,90	0,50	через муфту
18	цинкование в сернокислотном растворе; термическая обработка с нагревом в электропечи	пары серной кислоты	1200	2,0	0,90	1,6	0,80	0,60	плоскоремennая
19	травление азотной кислотой; термическая обработка в электропечи	пары азотной кислоты	2000	2,1	0,95	1,5	0,85	0,50	клиноремennая
20	цианистое цинкование; термическая обработка с нагревом в электропечи	пары синильной кислоты	180	2,2	1,00	1,6	0,90	0,60	непосредственно на валу
21	хромирование; термическая обработка с нагревом в электропечи	хромовый ангидрид	200	2,0	0,90	1,5	0,75	0,55	через муфту
22	работа со ртутью с нагрева; термическая обработка в электропечи	пары ртути	1800	2,1	0,95	1,6	0,80	0,50	плоскоремennая
23	обезжиривание перед покраской; термическая обработка с нагревом в электропечи	пары растворителя (уайт-спирит)	1500	2,2	1,00	1,5	0,90	0,60	через муфту
24	обезжиривание электролитическое; термическая обработка в электропечи	туман щелочей	210	2,0	0,95	1,6	0,80	0,55	плоскоремennая
25	точечная сварка мелких изделий; термическая обработка в электропечи	аэрозоль марганца	200	2,1	0,95	1,5	0,85	0,50	клиноремennая

### 3. РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

#### 3.1. Основные понятия и определения

Передача теплоты излучением происходит в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра распространения электромагнитных волн и зависит, в первую очередь, от температуры источника. Энергия тепловых излучений металлургических источников располагается главным образом в инфракрасном диапазоне спектра.

Энергия, излучаемая с поверхности тела в единицу времени по всем направлениям в пределах полусферы на всех длинах волн, называется *интегральным* или *полным тепловым потоком*  $Q$  (Вт). Тепловой поток, отнесенный к единице излучающей поверхности, называется *плотностью теплового потока излучения*  $q$  (Вт/м<sup>2</sup>), которую можно определить по закону Стефана-Больцмана:

$$q = \varepsilon \cdot q_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (3.1)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты;

$q_0$  – плотность теплового потока излучения абсолютно черного тела (АЧТ), Вт/м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – константа Стефана-Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$T$  – температура излучающей поверхности тела, К.

Для удобства инженерных расчетов формулу (3.1) обычно представляют в виде:

$$q = \varepsilon \cdot C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.2)$$

где  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) носит название *константа излучения АЧТ*.

Приведенные выше формулы характеризуют *полусферическое собственное излучение* тела  $q_{\text{соб}}$  (Вт/м<sup>2</sup>). Однако в практических расчетах интерес представляет доля полусферического излучения тела (например, раскаленного сляба), падающего на какую-нибудь поверхность (окно кабины оператора, лицо рабочего и т.п.). Эта доля характеризуется *угловым коэффициентом излучения*  $\varphi$ , равным:

$$\varphi = \frac{q_{\text{пад}}}{q_{\text{соб}}}, \quad (3.3)$$

Из формулы (3.3) следует, что:

$$q_{\text{пад}} = \varphi \cdot q_{\text{соб}} = \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (3.4)$$

Величину *плотности теплового потока падающего излучения*  $q_{\text{пад}}$  в охране труда называют **облученностью**.

Для ориентировочных расчетов удобно использовать эмпирическую формулу:

$$q_{\text{пад}} = q_{\text{соб}} \cdot l^{-n} \cdot \cos \theta, \quad (3.5)$$

где  $q_{\text{соб}}$  – плотность теплового потока собственного излучения источника (значения для некоторых источников приведены в табл. 3.1), кВт/м<sup>2</sup>;

$l$  – расстояние от источника излучения до объекта, м;

$n$  – константа (табл. 3.1);

$\theta$  – угол между нормалью к поверхности источника излучения и линией, соединяющей центры поверхностей источника излучения и объекта (рис. 3.1), град.

Таблица 3.1

**Значения  $q_{\text{соб}}$  и  $n$  для основных источников теплового излучения металлургических цехов [1]**

Цех/площадка	Источник теплового излучения	$q_{\text{соб}}$ , кВт/м <sup>2</sup>	$n$
Доменный	Наполняемые чугуном ковши и шлаковые чаши со шлаком	270	2
	Чугун и шлак в канавах во время выпуска	90	2
	Уборка скрапа на канавах	15	2
Конверторный	Футеровка конвертера после выпуска	243	1,5
	Выпускаемая сталь из конвертера	148	1,4
	Пламя и горловина при продувке с дожиганием	24,4	1,1
	Кожух конвертера	3,5	0,6
Электро-сталеплавильный	Сталь, выпускаемая из печи	351	1,9
	Загрузочное окно печи:		
	открыто при рафинировании стали	36	1,2
	открыто при заправке порога после загрузки лома	12,7	1,8
	полуоткрыто при скачивании шлака и загрузке раскислителя вручную	18,2	1,2
Футеровка печи при отведенном своде	9,3	0,8	

Цех/площадка	Источник теплового излучения	$q_{\text{соб}},$ кВт/м <sup>2</sup>	$n$
Мартеновский	Загрузочное окно печи:		
	открыто	157	1,3
	полуоткрыто	76	1,2
	Передняя стенка печи при закрытых окнах	7,8	0,4
	Головка печи и задняя стенка	4,3	0,6
Разливочная площадка	Изложницы или кристаллизатор МНЛЗ	9,0	1,6
Прокатный	Шлаковая летка и крышки нагревательных колосцев	11,2	1,1
	Окна загрузки и выгрузки методической печи:		
	открыты	29,0	1,4
	полуоткрыты	13,1	1,3
	закрыты	6,2	1,1
	Смотровые окна методических печей	13,6	1,2
	Нагретый металл на рольганге:		
	квадрат 800	18,1	1,4
	квадрат 260	11,7	1,4
	квадрат 78	3,7	1,7
лист 3600×10×12000	36,5	1,8	
лист 1500×5×3500	24,0	1,2	
лист 1500×5×1500	18,4	1,7	
рельс, швеллер	5,7	1,2	
Коксохимический	Пламя над четырьмя соседними стояками коксовой батареи	16,3	0,6
	Ячейка батареи при открытой двери	10,0	1,9
Агломерационный	Чашевый охладитель	71,0	0,8
	Транспортер с агломератом	69,3	1,0

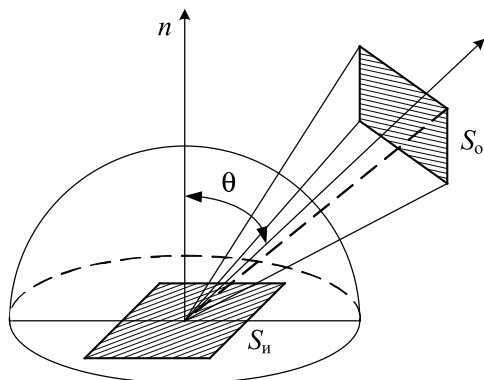


Рис. 3.1. Взаимное расположение источника излучения (поверхность  $S_n$ ) и объекта (поверхность  $S_o$ )

Тепловой поток падающего на поверхность тела излучения  $Q_{\text{пад}}$  (Вт) частично поглощается, частично отражается, а остаток проходит сквозь тело:

$$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}}, \quad (3.6)$$

где  $Q_{\text{погл}}$  – тепловой поток, поглощаемый телом, Вт;

$Q_{\text{отр}}$  – тепловой поток, отражаемый телом, Вт;

$Q_{\text{проп}}$  – тепловой поток, пропускаемый телом, Вт.

Формулу (3.6) часто представляют также в виде

$$1 = A + R + D, \quad (3.7)$$

где  $A = Q_{\text{погл}} / Q_{\text{пад}}$  – поглощательная способность тела;

$R = Q_{\text{отр}} / Q_{\text{пад}}$  – отражательная способность тела;

$D = Q_{\text{проп}} / Q_{\text{пад}}$  – пропускательная способность тела (среды).

Для АЧТ  $R = D = 0$  и  $A = 1$ , то есть АЧТ поглощает все падающее на него излучение.

При наличии теплового излучения на рабочих местах *нормируют* следующие параметры:

- температура воздуха на рабочих местах, °С;
- интенсивность теплового облучения (плотность теплового потока падающего излучения), Вт/м<sup>2</sup>;
- температура наружных поверхностей оборудования, °С;
- интегральный показатель тепловой нагрузки среды (ТНС), °С.

ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [2] устанавливает нормативные значения *тем-*

пературы воздуха рабочей зоны в зависимости от категории выполняемой работы для постоянных и временных рабочих мест. Также этот документ устанавливает нормативные значения *интенсивности теплового облучения* в зависимости от доли открытой поверхности тела человека. Интенсивность теплового облучения от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий, нагретых поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов и др.) не должна превышать значений, указанных в табл. 3.2:

Таблица 3.2

**Зависимость  $q_{\text{пад}}$  от доли открытой поверхности тела человека  $S$**

$S$	$\geq 0,5$	от 0,25 до 0,5	менее 0,25
$q_{\text{пад}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	35	70	100

Интенсивность теплового облучения работающих *от открытых источников* (нагретый металл, стекло, «открытое» пламя и др.) не должна превышать **140 Вт/м<sup>2</sup>**, при этом облучению не должно подвергаться более 25 % поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

В целях профилактики тепловых травм *температура наружных поверхностей* технологического оборудования или ограждающих его устройств не должна превышать **45 °С** (в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88 [2]). ГОСТ 12.4.123–83 «Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений» [3] устанавливает технические требования к средствам защиты от тепловых излучений (например, экраны) – они должны обеспечивать температуру поверхностей оборудования не выше **35 °С** при температуре внутри теплоисточника до 100 °С и не выше **45 °С** при температуре внутри теплоисточника выше 100 °С.

С 1 января 2013 г. вступил в силу СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41–03–2003» [4]. В соответствии с этим документом при проектировании теплоизоляции *температуру на поверхности тепловой изоляции оборудования* следует принимать в соответствии с табл. 3.3.

Таблица 3.3

**Температура на поверхности тепловой изоляции оборудования, расположенного в рабочей или обслуживаемой зонах помещений**

Температура содержащихся в оборудовании веществ, °С	Температура на поверхности тепловой изоляции, °С
свыше 500 °С	не более 55 °С
от 150 до 500 °С	не более 45 °С
150 °С и ниже	не более 40 °С

*Интегральный показатель тепловой нагрузки среды* (ТНС) используют для оценки сочетанного воздействия параметров микроклимата, и нормативные значения ТНС установлены в СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [5].

### 3.2. Средства защиты от теплового излучения

Согласно ГОСТ 12.4.011–89 «Средства защиты работающих. Общие требования и классификация» [6] все средства теплозащиты можно разделить на индивидуальные и коллективные.

К *индивидуальным средствам* относятся: специальная одежда, фартуки, обувь, рукавицы, защитные щитки со стеклом и (или) светофильтром.

Типы *коллективных средств* теплозащиты и области их применения приведены в табл. 3.4 [1].

Таблица 3.4

Области применения теплозащитных средств

Метод теплозащиты	Металлургический агрегат	Рабочее место	
		открытое	в замкнутом пространстве
Теплоизоляция	+	–	+
Экраны	+	+	+
Естественная вентиляция (аэрация)	–	+	–
Воздушное душирование	–	+	+
Мелкодисперсное распыление воды	–	+	–
Радиационное охлаждение	+	+	+

Эффективность любого теплозащитного устройства  $\Xi$  (%) оценивается как

$$\Xi = \frac{q_{\text{пад}} - q_{\text{проп}}}{q_{\text{пад}}} \cdot 100, \quad (3.8)$$

где  $q_{\text{пад}}$  – плотность теплового потока падающего на теплозащитное устройство (экран) излучения, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{\text{проп}}$  – плотность теплового потока пропущенного теплозащитным устройством (экраном) излучения, Вт/м<sup>2</sup>.



Из формулы (3.8), зная эффективность теплозащитного устройства, несложно найти плотность теплового потока пропущенного излучения

$$q_{\text{проп}} = q_{\text{пад}} \cdot (1 - 0,01 \cdot \varepsilon), \quad (3.9)$$

По принципу действия **экраны** подразделяются на: *теплоотражающие, теплопоглощающие, теплоотводящие и комбинированные*. Деление это условно, так как каждый экран обладает способностью отражать, поглощать и отводить тепло. В зависимости от того какая способность материала экрана наиболее выражена, его относят к той или иной группе.

При конструировании экрана стремятся получить низкую степень черноты обеих его поверхностей (как у теплоотражающих экранов), высокое термическое сопротивление (как у теплопоглощающих экранов) и благоприятные условия для естественного движения воздуха вдоль экрана (для конвективного теплоотвода).

По степени прозрачности экраны делят на: *непрозрачные* (светопропускание менее 40 %), *полупрозрачные* (светопропускание 40...75 %) и *прозрачные* (светопропускание более 75 %).

### 3.3. Расчет теплоотражающих экранов

Металлические отражающие экраны устанавливаются перед излучающей поверхностью. Отражающие экраны, как правило, выполняются из: стальных листов, окрашенных белой масляной или алюминиевой краской; алюминиевых или дюралюминиевых листов; закаленных стекол с пленочным покрытием др.

При условии, что на экран передается только лучистое тепло (при величине воздушной прослойки 15...20 мм влияние конвекционной составляющей на экран исключено) *температура металлических экранов*, применяемых для экранирования различных теплоизлучающих поверхностей (например, кладки печи), определяют по формуле:

$$T_э = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{T_{\text{и}}}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_{\text{в}}}{100}\right)^4}{1 + \varepsilon_{\text{пр}}}}, \quad (3.10)$$

где  $T_э$  – температура экрана, К;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы «излучающая поверхность – экран», определяемая по формуле (3.11);

$T_{\text{и}}$  – температура излучающей поверхности источника, К;

$T_{\text{в}}$  – среднее значение температуры воздуха в рабочей зоне, К.

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{и}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{э}}} - 1}, \quad (3.11)$$

где  $\varepsilon_{\text{и}}$ ,  $\varepsilon_{\text{э}}$  – степень черноты излучающей поверхности источника и экрана соответственно (прил. 3.1).

Формула (3.10) применима при условии, что  $T_{\text{и}} > T_{\text{э}} > T_{\text{в}}$  (температуры излучающей поверхности источника и экрана выше температур окружающих поверхностей оборудования, строительных конструкций и температуры воздуха), то есть поступление тепла на экран извне мало и им можно пренебречь.

**Задача 3.1.** Теплоотражающий экран установлен у стенки печи. Проверить соответствует ли температура экрана требованиям санитарных норм. Варианты заданий приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

**Варианты исходных данных к задаче 3.1**

№ варианта	Материал стенки печи	Температура задней стенки печи, К	Материал экрана	Температура воздуха в рабочей зоне, К
1	шамотный кирпич	600	алюминий полированный	298
2	диасовый кирпич	630	железо полированное	300
3	каолин	350	сталь листовая шлифованная	299
4	стальной лист	370	чугун полированный	308
5	кирпич огнеупорный	550	алюминий шероховатый	301
6	магнезитовый кирпич	625	жесть белая старая	298
7	шамотный кирпич	360	алюминий сильно окисленный	305
8	диасовый кирпич	380	железо оцинкованное блестящее	298
9	каолин	420	алюминий полированный	304
10	стальной лист	470	окрашенный алюминиевой краской стальной лист	300
11	кирпич огнеупорный	350	железо оцинкованное блестящее	307
12	магнезитовый кирпич	675	железо полированное	302
13	шамотный кирпич	375	сталь листовая шлифованная	306
14	диасовый кирпич	415	чугун полированный	299
15	каолин	450	алюминий шероховатый	300
16	стальной лист	520	жесть белая старая	308
17	кирпич огнеупорный	475	алюминий полированный	298

№ варианта	Материал стенки печи	Температура задней стенки печи, К	Материал экрана	Температура воздуха в рабочей зоне, К
18	магнезитовый кирпич	470	алюминий полированный	301
19	шамотный кирпич	515	алюминий сильно окисленный	305
20	динасовый кирпич	340	сталь листовая шлифованная	303
21	каолин	500	алюминий полированный	293
22	стальной лист	500	железо полированное	299
23	кирпич огнеупорный	375	окрашенный алюминиевой краской стальной лист	308
24	магнезитовый кирпич	410	чугун полированный	300
25	шамотный кирпич	465	алюминий шероховатый	293

### *Алгоритм расчета теплоотражающего экрана*

1. Определить приведенную степень черноты системы «излучающая поверхность – экран» по формуле (3.11), предварительно выбрав по прил. 3.1 степени черноты материалов стенки печи и экрана.
2. Рассчитать температуру экрана по формуле (3.10).
3. Сделать вывод о соответствии температуры экрана нормативному значению 45 °С в соответствии с [1].

### **3.4. Расчет теплоотводящих экранов**

Теплоотводящие экраны представляют собой полые сварные плиты из стальных листов толщиной 2...3 мм, в которых циркулирует техническая вода. Вода является средой, которая поглощает тепло и уносит его. Температура внешней стенки плиты определяется ее толщиной, скоростью протекания воды и ее начальной температурой.

Теплоотводящие экраны устанавливаются в зоне открывающихся крышек, дверец, заслонок и т.д. на расстоянии 500...600 мм от горячей поверхности и на расстоянии 15...20 мм от поверхности без проемов. Теплоотводящее экранирование поверхности печей должно обеспечивать температуру наружной поверхности экрана не выше 35 °С [3]. При перепаде температур между уходящей и входящей водой более 10 °С требуется большое количество воды, циркулирующей в системе, что затрудняет массовое применение теплоотводящих экранов. Ввиду этого расчет теплоотводящих экранов сводится к определению расхода воды.

Плотность теплового потока передаваемого источником излучения (например, стенкой печи) поверхности теплоотводящего экрана  $q_{\Pi}$  (Вт/м<sup>2</sup>) определяют по формуле:

$$q_{\text{п}} = C_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left( \left( \frac{T_{\text{и}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{э}}}{100} \right)^4 \right), \quad (3.12)$$

где  $C_0$  – константа излучения АЧТ, равная 5,67 Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  
 $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы «излучающая поверхность – экран», определяемая по формуле (3.11);  
 $T_{\text{и}}$  – температура излучающей поверхности источника, К;  
 $T_{\text{э}}$  – температура экрана (принимается равной температуре уходящей воды), К.

Считая, что тепло, полученное поверхностью экрана, полностью передается воде, необходимый расход воды для охлаждения экрана  $G$  (кг/ч) можно определить по формуле:

$$G = \frac{3600 \cdot A \cdot q_{\text{п}} \cdot F_{\text{э}}}{C \cdot (t_{\text{ух}} - t_{\text{пост}})}, \quad (3.13)$$

где  $A$  – поглощательная способность материала экрана и воды, принимаемый 0,93;  
 $F_{\text{э}}$  – площадь стенки экрана, м<sup>2</sup>;  
 $C$  – теплоемкость воды, равная 4,19·10<sup>3</sup> Дж/(кг·К);  
 $t_{\text{ух}}$  – температура уходящей воды (не более 35°С [3]), °С;  
 $t_{\text{пост}}$  – температура поступающей воды, °С.

**Задача 3.2.** У стенки мартеновской печи установлен теплоотводящий экран, изготовленный из стальных листов. Определить расход воды, обеспечивающий работу экрана. Варианты исходных данных приведены в табл. 3.6. При расчетах принять температуру поступающей воды 18 °С.

Таблица 3.6

Варианты исходных данных к задаче 3.2

№ варианта	Температура стенки печи, К	Материал стенки печи	Площадь экрана, м <sup>2</sup>
1	453	каолин	1,5
2	423	стальной лист	1,6
3	573	кирпич огнеупорный	1,8
4	623	магнезитовый кирпич	2,0
5	373	шамотный кирпич	1,5
6	533	динасовый кирпич	1,0
7	433	каолин	2,0
8	373	стальной лист	1,5

№ варианта	Температура стенки печи, К	Материал стенки печи	Площадь экрана, м <sup>2</sup>
9	543	кирпич огнеупорный	2,0
10	613	магнезитовый кирпич	1,9
11	423	шамотный кирпич	2,1
12	483	динасовый кирпич	1,4
13	393	каолин	1,7
14	413	стальной лист	2,0
15	463	кирпич огнеупорный	2,1
16	583	магнезитовый кирпич	1,5
17	383	шамотный кирпич	1,6
18	443	динасовый кирпич	1,8
19	383	каолин	1,7
20	413	стальной лист	2,1
21	593	кирпич огнеупорный	1,4
22	473	магнезитовый кирпич	2,0
23	393	шамотный кирпич	1,5
24	373	каолин	1,6
25	403	стальной лист	1,8

### *Алгоритм расчета теплоотводящего экрана*

1. Определить приведенную степень черноты системы «излучающая поверхность – экран» по формуле (3.11), предварительно выбрав по прил. 3.1 степени черноты материалов стенки печи и экрана.
2. Рассчитать плотность теплового потока, передаваемого излучающей поверхностью экрану по формуле (3.12).
3. Установить необходимый расход воды для охлаждения экрана по формуле (3.13).

### **3.5. Расчет теплопоглощающих экранов**

Теплопоглощающие экраны изготавливают из материалов с большим тепловым сопротивлением. В качестве таких экранов используют: металлические заслонки и щиты, футерованные огнеупорным или теплоизоляционным кирпичом; асбестовые щиты на металлической раме, сетке или листе и другие теплоизоляционные конструкции.

Теплопоглощающие экраны можно применять в условиях интенсивных тепловых излучений, высоких температур, механических ударов и запыленной среды.

Для уменьшения тепловых потерь в металлургических агрегатах и снижения температуры их кожуха; повышения эффективности теп-

лопоглощающих экранов, а также снижения теплового потока, проходящего через стены ограждения кабин (пультов) управления применяют различные теплопоглощающие материалы.

В качестве примера расчета теплопоглощающего экрана рассмотрим двухслойную стенку нагревательной печи (рис. 3.2), в которой огнеупорная футеровка (внутренний слой) выложена из шамотного кирпича, а наружный (теплоизоляционный) слой – каолинового ультралегковеса. Расчет сводится к определению толщины теплоизоляционного слоя  $\delta_2$  (м).

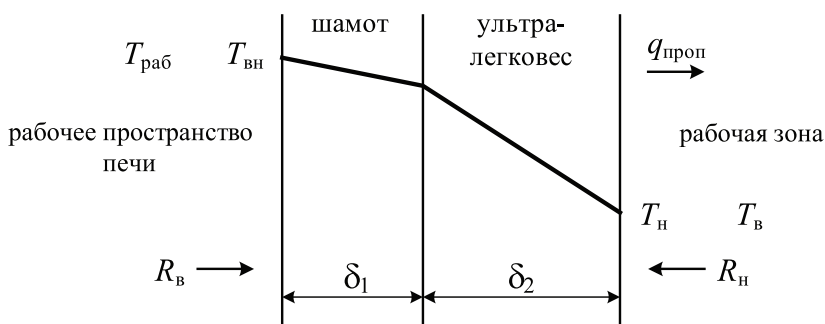


Рисунок 3.2. График изменения температуры стенки нагревательной печи

Плотность теплового потока пропущенного в рабочую зону  $q_{\text{проп}}$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) определяется в зависимости от величины суммарного теплового сопротивления и с учетом нормируемого значения температуры наружной поверхности стенки печи  $T_{\text{н}}$  (К), которая согласно требованиям СП 61.13330.2012 [4] не должна превышать значений приведенных в табл. 3.3.

Суммарное тепловое сопротивление  $R_{\Sigma}$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ) можно определить по формуле:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{в}} + R_{\text{с}} + R_{\text{н}}, \quad (3.14)$$

где  $R_{\text{в}}$  – сопротивление тепловосприятию внутренней поверхности стенки печи,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;

$R_{\text{с}}$  – тепловое сопротивление стенки печи,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;

$R_{\text{н}}$  – сопротивление теплоотдаче наружной поверхности стенки печи,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Считая процесс передачи тепла через стенку печи стационарным, суммарное тепловое сопротивление  $R_{\Sigma}$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ) может быть выражено:

$$R_{\Sigma} = \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{раб}}}{q_{\text{проп}}} + \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{н}}}{q_{\text{проп}}} + \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{в}}}{q_{\text{проп}}}, \quad (3.15)$$

где  $q_{\text{проп}}$  – плотность теплового потока пропущенного излучения в рабочую зону (от наружной поверхности стены печи),  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $T_{\text{вн}}$  – температура внутренней поверхности стенки печи, К;  
 $T_{\text{раб}}$  – температура рабочего пространства печи, К;  
 $T_{\text{н}}$  – температура наружной поверхности стенки печи, К;  
 $T_{\text{в}}$  – температура воздуха рабочей зоны, К.

При температуре наружной поверхности стенки печи 40...55 °С (нормативное значение) можно сделать допущение, что доли теплоотдачи излучением и конвекцией примерно равны. В этом случае плотность теплового потока пропущенного излучения в рабочую зону  $q_{\text{проп}}$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) составит:

$$q_{\text{проп}} = 2 \cdot C_0 \cdot \left( \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right), \quad (3.16)$$

где  $C_0$  – константа излучения АЧТ, равная 5,67  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Тепловое сопротивление двухслойной стенки печи  $R_c$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ) может быть выражено:

$$R_c = R_{c1} + R_{c2} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \quad (3.17)$$

где  $R_{c1}$  и  $R_{c2}$  – соответственно тепловое сопротивление внутреннего (огнеупорная футеровка шамотом) и наружного (теплоизоляция из легковеса) слоев стенки печи,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  
 $\delta_1$  и  $\delta_2$  – соответственно толщина внутреннего (шамот) и наружного (легковес) слоев стенки печи, м;  
 $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – соответственно коэффициент теплопроводности материала внутреннего (шамот) и наружного (легковес) слоев стенки печи,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Значения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов можно определить из табл. 3.7.

**Коэффициенты теплопроводности  
наиболее часто применяемых материалов**

Огнеупорный материал	$\lambda_1$ , Вт/(м·К)	Изоляционный материал	$\lambda_2$ , Вт/(м·К)
Динас	$0,815+0,00067 \cdot T_{\text{вн}}$	Шамот-легковес	$0,1116+0,00016 \cdot T_{\text{н}}$
Шамот	$0,75+0,00064 \cdot T_{\text{вн}}$	Диатомовый кирпич	$0,116+0,00015 \cdot T_{\text{н}}$
Каолин плотный	$1,75+0,00086 \cdot T_{\text{вн}}$	Асбестовый картон	$0,157+0,00014 \cdot T_{\text{н}}$
Высокоглиноземистый	$0,84+0,00058 \cdot T_{\text{вн}}$	Пеношамот	$0,28+0,00023 \cdot T_{\text{н}}$
Магнезит	$6,28-0,0027 \cdot T_{\text{вн}}$	Ультралегковес	$0,19+0,00012 \cdot T_{\text{н}}$
Огнеупорный бетон	$0,4+0,0001 \cdot T_{\text{вн}}$	Пенобетон	$0,098+0,000145 \cdot T_{\text{н}}$

Принимая в формуле (3.15) равенство температур  $T_{\text{вн}} = T_{\text{раб}}$ , получим из формул (3.15) и (3.17):

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{н}}}{q_{\text{проп}}}, \quad (3.18)$$

Откуда:

$$\delta_2 = \lambda_2 \cdot \left( \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{н}}}{q_{\text{проп}}} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right). \quad (3.19)$$

**Задача 3.3.** Определить оптимальную толщину теплоизоляции нагревательной печи. Варианты исходных данных приведены в табл. 3.8. При расчетах учесть, что при наличии тепловых излучений (для категории выполняемых работ II б на непостоянных рабочих местах) температура воздуха рабочей зоны должна быть не выше 21 °С (294 К).

Таблица 3.8

**Варианты исходных данных к задаче 3.3**

№ варианта	Материал огнеупорной футеровки печи	Температура внутренней поверхности стенки печи $T_{\text{вн}}$ , К	Толщина огнеупорной футеровки $\delta_1$ , м	Материал теплоизоляции печи
1	шамот	1073	0,25	шамот-легковес
2	динас	973	0,25	диатомовый кирпич
3	магнезит	873	0,12	пенобетон



№ варианта	Материал огнеупорной футеровки печи	Температура внутренней поверхности стенки печи $T_{вн}$ , К	Толщина огнеупорной футеровки $\delta_1$ , м	Материал теплоизоляции печи
4	каолин	883	0,25	пеношамот
5	огнеупорный бетон	1273	0,25	ультра-легковес
6	шамот	1173	0,12	пенобетон
7	огнеупор высокоглиноземистый	1223	0,12	шамот-легковес
8	каолин	1023	0,12	диатомовый кирпич
9	динас	923	0,25	шамот-легковес
10	магнезит	823	0,25	пеношамот
11	шамот	963	0,12	ультра-легковес
12	динас	1143	0,25	пенобетон
13	магнезит	1033	0,12	шамот-легковес
14	каолин	953	0,25	диатомовый кирпич
15	огнеупорный бетон	883	0,12	пенобетон
16	шамот	983	0,12	шамот-легковес
17	огнеупор высокоглиноземистый	1153	0,25	ультра-легковес
18	каолин	1323	0,25	пенобетон
19	динас	1263	0,12	шамот-легковес
20	каолин	1153	0,12	пенобетон
21	шамот	973	0,12	диатомовый кирпич
22	динас	913	0,25	пеношамот
23	магнезит	1073	0,12	ультра-легковес
24	магнезит	1143	0,25	диатомовый кирпич
25	огнеупорный бетон	893	0,25	шамот-легковес

### ***Алгоритм расчета теплопоглощающего экрана***

1. В зависимости от заданной температуры внутренней поверхности стенки печи  $T_{\text{вн}}$  (К) выбрать нормативное значение температуры поверхности теплоизоляции печи  $T_{\text{н}}$  (К) по табл. 3.3.

2. По табл. 3.7 рассчитать коэффициенты теплопроводности огнеупорной футеровки печи  $\lambda_1$  (Вт/(м·К)) и материала теплоизоляции  $\lambda_2$  (Вт/(м·К)) при соответствующих температурах.

3. Определить плотность теплового потока пропущенного излучения в рабочую зону  $q_{\text{проп}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) по формуле (3.16).

4. Вычислить оптимальную толщину теплоизоляции нагревательной печи  $\delta_2$  (м) по формуле (3.19).

5. Поскольку кирпич имеет стандартные размеры  $250 \times 120 \times 65$  мм, а блоки из пенобетона выпускают шириной: 100, 120, 150, 200, 300, 400 и 600 мм; то полученное значение толщины теплоизоляционного слоя печи следует увеличить до ближайшего значения, кратного стандартным размерам.

### **3.6. Расчет прозрачных экранов**

Прозрачные экраны применяются в горячих цехах главным образом как средство коллективной защиты работающих от тепловых излучений в постах управления.

В настоящее время для экранов используют: стекло силикатное, кварцевое и органическое (плексиглас), бесцветное и окрашенное (толщиной 8..10 мм); вода в слое и в дисперсном состоянии; тонкие металлические пленки, осажденные на стекле.

При расчетах прозрачных экранов необходимо учитывать спектральный состав излучения, однако, в ряде случаев (при температуре источника излучения 1500 К и менее), достаточна интегральная характеристика спектра излучения.

Расчет прозрачного экрана необходимо начинать с определения облученности смотрового проема поста управления (плотности теплового потока падающего излучения)  $q_{\text{пад}}$  (Вт/м<sup>2</sup>). Учитывая плотность потока собственного излучения источника (для некоторых источников значения приведены в табл. 3.1; при отсутствии данных – по формуле (3.2)), а также в зависимости от взаимного расположения излучающей поверхности источника и поверхности прозрачного экрана (рис. 3.3), облученность смотрового проема можно определить по формуле (3.5).

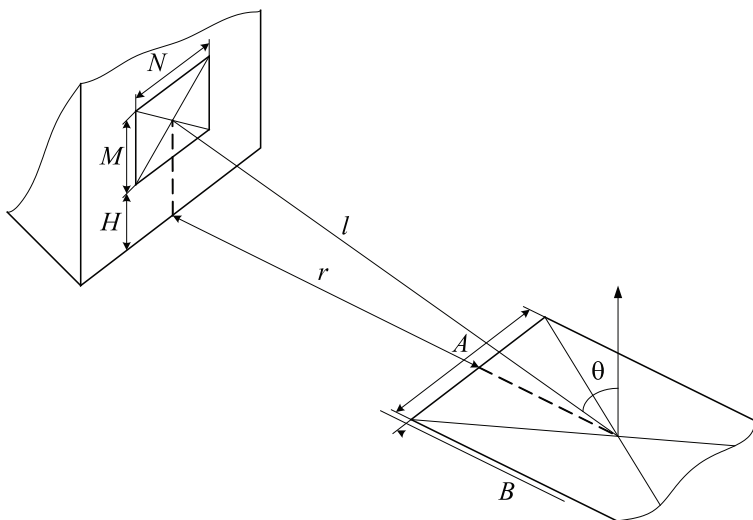


Рис. 3.3. Пример расчетной схемы для определения облученности смотрового проема поста управления

По облученности смотрового проема и длительности ее воздействия определяется вид стекла, который может быть использован для защиты работающих. Допустимые облученности стекол в зависимости от температуры источника излучения приведены в прил. 3.2.

При выборе вида стекла также важно учитывать его стоимость. Наиболее дешевое – органическое, далее по возрастанию стоимости – закаленное; закаленное окрашенное; закаленное с нанесением пленочного покрытия; армированное стекло (закаленное стекло со стальной сеткой).

Далее, согласно температуре источника излучения и виду выбранного стекла по рис. 3.4 (для случая периодического воздействия облученности на стекло) устанавливается эффективность теплозащиты экрана. При постоянном воздействии облученности значение эффективности, определенное по рис. 3.4, должно быть снижено на **10 %**.

Плотность теплового потока пропущенного прозрачным экраном (выбранным стеклом) излучения определяется по формуле (3.9). Если облученность за стеклом (считая, что работающий находится в непосредственной близости) превышает нормативное значение ( $140 \text{ Вт/м}^2$  [2]), то необходимо увеличить защиту (выбрать другое стекло, ввести дополнительное второе остекление, использовать стальную сетку и пр.).

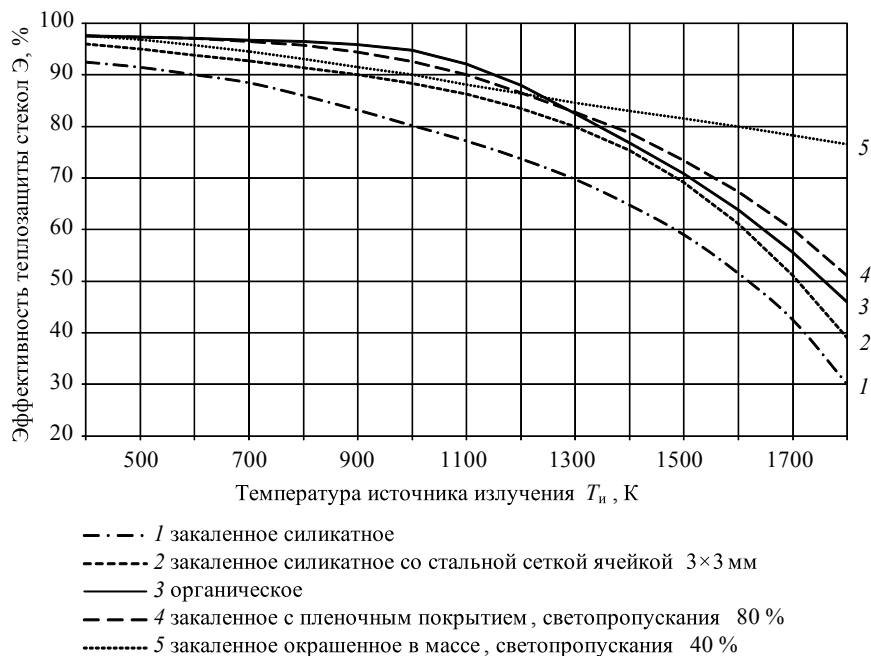


Рис. 3.4. Эффективность теплозащиты стекол в зависимости от температуры источника излучения (в случае периодического воздействия облученности)

**Задача 3.4.** Подобрать материал для прозрачного экрана пульта управления. Размер смотрового проема, находящегося на высоте  $H$  (м) от уровня пола, составляет  $M \times N$  (м<sup>2</sup>). Пульт управления расположен на расстоянии  $r$  (м) от источника теплового излучения (размерами  $A \times B$  (м<sup>2</sup>) и температурой  $T_{и}$  (К)). Варианты заданий представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Варианты исходных данных к задаче 3.4

№ варианта	Источник излучения	Периодичность наблюдения	Параметры источника			Смотровой проем			Расстояние $r$ , м
			A, м	B, м	$T_{\text{ис}}$ К	M, м	N, м	H, м	
1	нагретый металл на рольганге лист 3600×10×12000 (прокатный цех)	постоянно	12,00	3,60	1173	1,0	2,0	1,1	4
2	нагретый металл на рольганге квадрат 800(прокатный цех)	постоянно	0,80	0,80	1773	1,0	1,0	0,8	5
3	изложница (разливочная площадка)	постоянно	3,00	2,00	1693	1,1	1,9	1,1	4
4	нагретый металл на рольганге рельс (прокатный цех)	постоянно	12,50	0,15	1663	1,2	1,7	0,9	5
5	крышка нагревательного колодца (прокатный цех)	постоянно	15,00	6,00	823	1,0	1,9	1,0	6
6	чугун в канаве во время выпуска (доменный цех)	периодически	10,00	0,50	1643	0,8	1,6	0,8	5
7	шлаковая чаша со шлаком (доменный цех)	периодически	2,00	2,00	1673	1,0	1,8	1,0	7
8	транспортер с агломератом (агломерационный цех)	постоянно	12,00	2,00	1223	0,9	1,8	1,0	10
9	шлак в канаве во время выпуска (доменный цех)	периодически	10,00	0,60	1673	1,0	2,1	0,9	5
10	нагретый металл на рольганге лист 1500×5×3500 (прокатный цех)	постоянно	3,50	1,50	1163	1,3	2,2	0,8	4,5
11	шлаковая чаша со шлаком (доменный цех)	периодически	2,50	2,00	1663	1,1	1,8	1,0	8
12	нагретый металл на рольганге лист 1500×5×3500 (прокатный цех)	постоянно	3,50	1,50	1123	1,0	1,7	0,9	5

Окончание табл. 3.9

№ варианта	Источник излучения	Периодичность наблюдения	Параметры источника			Смотровой проем			Расстояние $r$ , м
			$A$ , м	$B$ , м	$T_{\text{в.к}}$	$M$ , м	$N$ , м	$H$ , м	
13	изложница (разливочная площадка)	постоянно	2,50	1,50	1653	1,1	2,0	1,1	2,5
14	нагретый металл на рольганге рельс (прокатный цех)	постоянно	12,50	0,15	1253	0,8	1,8	1,0	4
15	крышка нагревательного колодца (прокатный цех)	периодически	12,00	8,00	873	1,0	2,0	0,8	3
16	нагретый металл на рольганге швеллер (прокатный цех)	постоянно	12,00	0,15	1193	1,2	1,6	0,9	7
17	чугун в канаве во время выпуска (доменный цех)	периодически	8,00	0,70	1623	1,0	1,9	1,1	5,5
18	нагретый металл на рольганге лист $1500 \times 5 \times 3500$ (прокатный цех)	постоянно	3,50	1,50	1273	1,5	2,5	1,0	5
19	транспортер с агломератом (агломерационный цех)	постоянно	10,00	1,50	1183	1,2	2,0	1,1	12
20	шлак в канаве во время выпуска (доменный цех)	периодически	7,00	0,50	1683	1,0	1,8	0,9	5
21	шлаковая чаша со шлаком (доменный цех)	периодически	2,20	1,70	1673	0,9	1,4	0,8	7
22	нагретый металл на рольганге лист $3600 \times 10 \times 12000$ (прокатный цех)	постоянно	12,00	3,60	1223	1,4	2,1	1,0	3,5
23	изложница (разливочная площадка)	постоянно	2,60	2,00	1773	1,0	1,8	1,1	2,8
24	чугун в канаве во время выпуска (доменный цех)	периодически	8,00	0,60	1663	1,5	2,0	0,8	6
25	изложница (разливочная площадка)	периодически	2,50	1,80	1473	1,1	1,7	1,0	6

### *Алгоритм расчета прозрачного экрана*

1. По табл. 3.1 в соответствии с исходными данными выбрать плотность потока собственного излучения источника  $q_{\text{соб}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) и константу  $n$ .
2. Определить  $l$  (м) – расстояние от центра поверхности источника излучения до центра смотрового проема – в соответствии с рис. 3.3.
3. Рассчитать  $\cos\theta$  – угла между нормалью к поверхности источника излучения и линией, соединяющей центры поверхностей источника и смотрового проема (рис. 3.3).
4. Установить плотность теплового потока падающего излучения  $q_{\text{пад}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) на смотровой проем по формуле (3.5).
5. По рис. 3.4 определить эффективность теплозащиты стекла для смотрового проема пульта управления  $\Xi$  (%) с учетом температуры источника излучения. При выборе стекла предпочтение следует отдавать стеклам с наименьшей стоимостью, наибольшим светопропусканием и с учетом допустимой облученности (прил. 3.2). Полученную эффективность следует уменьшить на 10 % в случае постоянного режима облучения.
6. Определить плотность теплового потока пропущенного излучения  $q_{\text{проп}}$  (Вт/м<sup>2</sup>) по формуле (3.9).
7. Проверить соответствие величины плотности теплового потока пропущенного излучения нормативу 140 Вт/м<sup>2</sup> (считая, что работающий находится в непосредственной близости от стекла). В случае превышения норматива необходимо подобрать другое стекло (с большей эффективностью).
8. В ответе указать геометрические параметры и материал прозрачного экрана, который необходимо установить в смотровой проем пульта управления.

### **Библиографический список**

1. Теплозащита в металлургии. Справочник. Петров С.В., Шорин А.Ф. – М.: «Металлургия», 1981. – 120 с.
2. ГОСТ 12.1.005–88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны – М.: ВГУП «Стандартинформ», 2006.
3. ГОСТ 12.4.123–83 Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений – М.: ВГУП «Стандартинформ», 2006.
5. СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. актуализированная редакция СНиП 41–03–2003 – М.: Министерство регионального развития РФ, 2012.
6. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997.
7. ГОСТ 12.4.011–89 Средства защиты работающих. Общие требования и классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.

## Степень черноты некоторых материалов [1]

Материал	Степень черноты	Материал	Степень черноты
Алюминий: полированный шероховатый сильно окисленный	0,04...0,062	Асбестовый материал: картон шифер ткань	0,96
	0,06...0,07		0,96
	0,11...0,30		0,78
Алюминиевые краски разного возраста	0,20...0,67	Кирпичная кладка оштукатуренная	0,94
Железо: полированное  свежеобработанное наждаком окисленное гладкое оцинкованное блестящее оцинкованное окисленное	0,14...0,38	Цемент	0,54
		Штукатурка шероховатая	0,91...0,93
	0,24	Краски масляные различных цветов	0,92...0,96
	0,74...0,82	Кирпич: обожженный огнеупорный	0,65...0,76
	0,23		0,65...0,75
0,28	высокоогнеупорный шамотный динасовый магнетитовый красный силикатный	0,82...0,87 0,59...0,85 0,66 0,38 0,88...0,93 0,66	
Жесть белая старая	0,28	Лак: черный матовый черный блестящий, распыленный по железу жаропрочный	0,96...0,98 0,87...0,88 0,92...0,93
Сталь: листовая шлифованная мягкая расплавленная окисленная (стальной лист)	0,52...0,61	Стекло: обычное матовое	0,91...0,94
	0,28		0,96
	0,80...0,98		
Чугун: полированный окисленный расплавленный	0,11		
	0,64...0,78		
	0,28...0,29		
Чугунное литье	0,81		
Вода	0,95...0,98		
Глина обожженная	0,91		
Каолин	0,40		



**Допустимые облученности стекол и их состояние  
в зависимости от температуры источника излучения [1]**

Исследуемые стекла	Температура источника, К				Состояние стекла
	2073	1273	673	673...2073	
	Облученность, кВт/м <sup>2</sup>				
	постоянно		периодически		
Стекло:					
обычное	7,00	5,25	3,50	7,00	растрескивается деформации нет размягчается при температуре ок- ружающего воз- духа свыше 301 К
закаленное	14,00	14,00	14,00	14,00	
органическое белое	5,25	5,25	3,50	7,00	
Стекло с пленочным покрытием:					
теплозащитное закаленное 80% светопропускания	14,00	14,00	14,00	14,00	деформации нет
теплозащитное незакаленное 80% светопропускания	3,50	5,25	5,25	7,00	растрескивается
окрашенное в массе теплозащитное закаленное 40% светопропускания	14,00	14,00	14,00	14,00	деформации нет
теплозащитное незакаленное 40% светопропускания	7,00	3,50	3,50	7,00	растрескивается

## 4. РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

### 4.1. Основные понятия и определения

В зависимости от вида электроустановки, номинального напряжения, режима нейтрали, условий среды помещения и доступности электрооборудования применяют определенный комплекс необходимых защитных мер, обеспечивающих достаточную безопасность. Применение защитных мер регламентируется Правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

Различают электроустановки напряжением до 1000 В и выше 1000 В; с изолированной и заземленной нейтралью. В электроустановках применяют следующие технические защитные меры: 1) защитное заземление; 2) зануление; 3) выравнивание потенциалов; 4) защитное отключение; 5) малое напряжение и другие.

Наиболее распространенными техническими средствами для защиты людей при появлении напряжения на нетоковедущих частях оборудования из-за повреждения изоляции являются *защитное заземление и зануление*.

*Защитным заземлением* называется преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Принцип действия — снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус. Это достигается уменьшением потенциала заземленного оборудования, а также выравнивания потенциалов за счет подъема потенциала основания, на котором стоит человек до потенциала, близкого к потенциалу заземленного оборудования.

Защитное заземление применяют в сетях напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью и в сетях напряжением свыше 1000 В как с изолированной нейтралью, так и с заземленной нейтралью.

*Заземляющее устройство* — совокупность заземлителей, металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей, и заземляющих проводников, соединяющих электроустановку с системой заземлителей.

По расположению заземлителей относительно заземленных корпусов заземления делят на *выносные* и *контурные*. В первом случае заземлители располагаются на некотором удалении от заземляемого

оборудования, во втором - по контуру вокруг заземленного оборудования на небольшом (несколько метров) расстоянии друг от друга. В качестве искусственных заземлителей используют вертикально расположенные стержни из уголкового стали или стальных труб. Заземлители соединяют стальной полосой, которую приваривают к каждому заземлителю. Заземлители с заземляемым оборудованием соединяют металлическими проводниками. *Сопротивления заземления*, согласно ПУЭ, нормируются в зависимости от напряжения, режима работы нейтрали, мощности и других данных электроустановки.

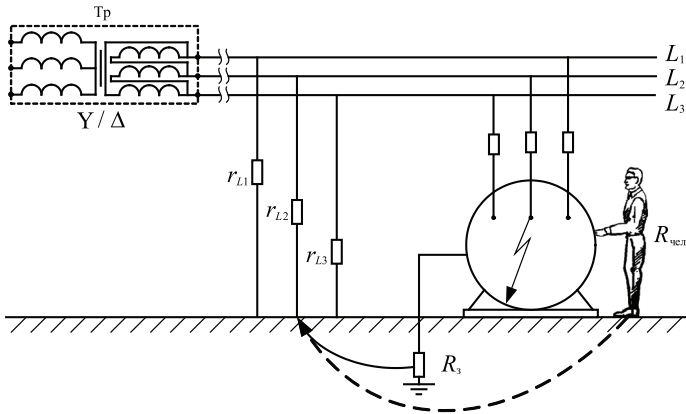


Рис. 4.1. Схема защитного заземления

*Занулением* называется преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Цель зануления - обеспечить быстрое отключение установки от сети при замыкании фазы (или фаз) на ее корпус, а также снизить напряжение на корпусе в аварийный период. Это достигается путем превращения замыкания на корпус в *однофазное короткое замыкание* с созданием в этой цепи значения тока, достаточного для срабатывания защиты. Зануление применяется в трехфазных четырехпроводных сетях напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью. Полная проводимость *нулевого провода* во всех случаях должна быть не менее 50 % проводимости *фазного провода*. Если эти требования по каким-либо причинам не удовлетворяются, отключение при замыкании на корпус должно обеспечиваться специальными защитами, например, защитным отключением.

## 4.2. Расчет защитного заземления

Цель расчета заземления - определить параметры заземляющего устройства: число и длину вертикальных элементов (стержней), длину горизонтальных элементов (соединительных полос) и разместить заземлители на плане электроустановки, исходя из значений допустимых сопротивления и максимального потенциала заземлителя.

### Методика расчета защитного заземления

1. Определяют нормативное значение сопротивления заземления  $R_{н}$ . В электроустановках напряжением до 1000 В сопротивление защитного заземления должно быть не более 4 Ом. Если суммарная мощность источников (трансформаторов, генераторов), подключенных к сети, не превышает 100 кВт·А, сопротивление должно быть не более 10 Ом. В электроустановках напряжением выше 1000 В с малым током замыкания (менее 500 А) допускается сопротивление заземления не более 10 Ом, а с большим током замыкания (более 500 А) – не более 0,5 Ом.

2. Определяют расчетное удельное сопротивление грунта  $\rho_{расч}$  с учетом климатического коэффициента  $\rho_{расч} = \rho_{табл} \cdot \psi$ , где  $\rho_{табл}$  – удельное сопротивление грунта (табл. 4.1);  $\psi$  - климатический коэффициент (табл. 4.2). При определении значения климатических коэффициентов из табл.4.2 выбирают верхнее значение (пример: 1,8...2,0 – следует выбрать 2,0), как наиболее опасное.

Таблица 4.1

**Значения удельных сопротивлений грунтов при влажности 10...12 % к массе грунта**

Грунт	Удельное сопротивление, Ом·м	Грунт	Удельное сопротивление, Ом·м
Глина	40	Супесок	300
Суглинок	100	Песок	700
Чернозем	200	Скальный	2000

Таблица 4.2

**Значения климатических коэффициентов и признаки зон**

Тип заземлителя	Климатические зоны			
	I	II	III	IV
Вертикальные стержни длиной $l_c = 2...3$ м и при глубине заложения $H_0 = 0,5...0,8$ м	1,8...2,0	1,5...1,8	1,4...1,6	1,2...1,4
Горизонтальные полосовые заземлители при глубине заложения $H_0 = 0,8$ м	4,5...7,0	3,5...4,5	2,0...2,5	1,5...2,0
Признаки климатических зон				
Средняя температура января, °С	-20...-15	-14...-10	-10...0	0...5
Средняя температура июля, °С	16...18	18...22	22...24	24...28

3. Определяют сопротивление одиночного вертикального заземлителя  $R_c$  с учетом удельного сопротивления грунта:

$$R_c = \frac{\rho_{\text{расч}}^c}{2\pi l_c} \left( \ln \frac{2l_c}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + l_c}{4H - l_c} \right), \quad (4.1)$$

где  $d$  - диаметр стержня, м;  $H = H_0 + l_c / 2$ ;  $l_c, H_0$  - см. табл. 4.2.

4. Учитывая норму сопротивления заземления  $R_n$ , определяют число вертикальных заземлителей без учета взаимного экранирования:

$$n = R_c / R_n, \quad (4.2)$$

5. Разместив заземлители на плане и, задавшись отношением  $\eta$  расстояния между одиночными заземлителями  $S$  к их длине  $l_c$ , определяют с учетом коэффициента использования вертикальных стержней (табл. 4.3) их число  $n_1 = n / \eta_c$ . Окончательное число заземлителей  $n_2$  определяется из конкретных условий расположения заземлителей. Сопротивление заземлителей – без учета соединительной полосы:  $R_{cc} = R_c / (n_2 \eta_c)$ .

Таблица 4.3

**Коэффициенты использования  $\eta_c$  вертикальных заземлителей**

Отношение расстояния между заземлителями к их длине	Число заземлителей $n$							
	2	4	6	10	20	40	60	100
<i>Заземлители располагаются в ряд</i>								
1	0,85	0,73	0,65	0,59	0,48	–	–	–
2	0,91	0,83	0,77	0,74	0,67	–	–	–
<i>Заземлители располагаются по контуру</i>								
1	–	0,69	0,61	0,55	0,47	0,41	0,39	0,36
2	–	0,78	0,73	0,68	0,63	0,58	0,55	0,52
3	–	0,85	0,80	0,76	0,71	0,66	0,64	0,62

6. Определяют сопротивление соединительной полосы  $R_n$ :

$$R_n = \frac{\rho_{\text{расч}}^n}{2\pi l_n} \ln \frac{2l_n^2}{bH_1}, \quad (4.3)$$

где  $l_n = 1,05 \cdot (n_2 - 1) \cdot S$  – длина соединительной полосы, м;

$b, H_1$  – ширина и глубина заложения соединительной полосы, м.

С учетом коэффициента использования полосы  $\eta_{\Pi}$  (табл. 4.4) уточняют  $R'_{\Pi} = R_{\Pi} / \eta_{\Pi}$ .

Таблица 4.4

**Коэффициенты использования  $\eta_{\Pi}$  горизонтальной полосы, соединяющей вертикальные заземлители**

Отношение расстояния между заземлителями к их длине	Число вертикальных заземлителей $n_2$							
	2	4	6	10	20	40	60	100
<i>Вертикальные заземлители расположены в ряд</i>								
1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42	–	–	–
2	0,94	0,89	0,84	0,75	0,56	–	–	–
<i>Вертикальные заземлители расположены по контуру</i>								
1	–	0,45	0,40	0,34	0,27	0,22	0,20	0,19
2	–	0,55	0,48	0,40	0,32	0,29	0,27	0,23
3	–	0,70	0,64	0,56	0,45	0,39	0,36	0,33

7. Определяют общее сопротивление заземляющего устройства и соединявшей полосы:

$$R = \frac{R_{cc} \cdot R'_{\Pi}}{R_{cc} + R'_{\Pi}}, \quad (4.4)$$

и проверяют, соответствует ли оно нормативному значению  $R_{\Pi}$ .

**Задача 4.1.** Спроектировать защитное заземление оборудования лаборатории (ЛАБ) или понижающей подстанции (ПП) 6/0,4 кВ, от которой питается лаборатория. Заземляющее устройство заглублено:  $H_0 = 0,5 \dots 0,8$  м. Для вертикальных заземлителей длиной  $l_c = 2,0 \dots 3,5$  м использовать стальные трубы диаметром не менее 25 мм или уголок с полкой не менее 25 мм. Для соединительной полосы использовать стальную шину сечением 40 x 4 мм. Варианты остальных исходных данных приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

**Варианты исходных данных к задаче 4.1**

№ вар.	Объект защиты	Параметры трансформатора		Климатическая зона	Грунт	Расположение вертикальных заземлителей
		мощность, кВ·А	Соединение обмоток			
1	ЛАБ	40	$\Delta/\Delta_{\Pi}$	I	суглинок	в ряд
2	ЛАБ	100	$\Delta/\Delta_{\Pi}$	III	чернозем	в ряд
3	ПП	630	Y/ $\Delta_{\Pi}$	I	супесок	по контуру
4	ЛАБ	250	$\Delta/\Delta_{\Pi}$	IV	песок	в ряд

№ вар.	Объект защиты	Параметры трансформатора		Климатическая зона	Грунт	Расположение вертикальных заземлителей
		мощность, кВт·А	Соединение обмоток			
5	ПП	400	Y/ $\Delta_n$	III	суглинок	по контуру
6	ЛАБ	63	Y/ $\Delta_n$	II	глина	в ряд
7	ПП	100	$\Delta/\Delta_n$	IV	чернозем	по контуру
8	ЛАБ	63	Y/ $\Delta_n$	I	песок	в ряд
9	ПП	160	Y/ $\Delta_n$	II	супесок	по контуру
10	ЛАБ	400	$\Delta/\Delta_n$	III	глина	в ряд
11	ПП	1000	Y/ $\Delta_n$	II	суглинок	по контуру
12	ЛАБ	300	$\Delta/\Delta_n$	IV	супесок	в ряд
13	ПП	630	Y/ $\Delta_n$	III	песок	по контуру
14	ЛАБ	160	$\Delta/\Delta_n$	I	суглинок	в ряд
15	ПП	630	Y/ $\Delta_n$	IV	супесок	по контуру
16	ПП	40	$\Delta/\Delta_n$	III	чернозем	по контуру
17	ЛАБ	250	Y/ $\Delta_n$	II	глина	в ряд
18	ПП	160	Y/ $\Delta_n$	I	песок	по контуру
19	ЛАБ	63	$\Delta/\Delta_n$	IV	чернозем	в ряд
20	ПП	400	Y/ $\Delta_n$	II	глина	по контуру
21	ЛАБ	100	$\Delta/\Delta_n$	III	суглинок	в ряд
22	ПП	400	Y/ $\Delta_n$	II	супесок	по контуру
23	ЛАБ	160	$\Delta/\Delta_n$	I	глина	в ряд
24	ПП	630	Y/ $\Delta_n$	IV	песок	по контуру
25	ЛАБ	400	$\Delta/\Delta_n$	II	суглинок	в ряд

### *Алгоритм расчета защитного заземления*

1. Выбрать нормативное значение сопротивления защитного заземления  $R_n$  для заданной мощности трансформатора.

2. Определить (см. п.2 методики) расчетные удельные сопротивления грунта  $\rho_{расч}$  для стержней  $\rho_{расч}^c$  и для соединительной полосы  $\rho_{расч}^n$ .

3. Определить по формуле (4.1) сопротивление одиночного вертикального заземлителя  $R_c$ , задавшись конкретными значениями  $d$ ,  $l_c$ ,  $H_0$ . Для уголковых стержней эквивалентный диаметр  $d = 0,95 \cdot b$ , где  $b$  – ширина полки, м.

4. Определить по формуле (4.2) число заземлителей  $n$  без учета взаимного экранирования.

5. Понижающая подстанция (ПП) – небольшое, отдельно стоящее здание, поэтому заземляющее устройство выбирают контурное в виде прямоугольника, а для защитного заземления оборудования лаборатории (ЛАБ) лучше спроектировать выносное заземление. Исходя

из реальных условий, выбрать отношение  $\eta = S/l_c$  (см. табл. 4.3) и определить коэффициент использования вертикальных стержней  $\eta_c$ , окончательно их число  $n_2$  и сопротивление заземлителей без учета соединительной полосы  $R_{cc}$ .

6. Определить длину соединительной полосы  $l_{п}$  (см. п.6 методики), выбрать значение  $H_1$  (например, равно  $H_0$ ) и вычислить по формуле (4.3) сопротивление соединительной полосы  $R_{п}$ . По табл. 4.4 определить коэффициент использования полосы  $\eta_{п}$  и рассчитать сопротивление соединительной полосы с учетом экранирования  $R'_{п}$ .

7. Вычислить по формуле (4.4) общее сопротивление заземляющего устройства  $R$ . Сравнить полученное расчетное сопротивление  $R$  с нормативным значением  $R_n$ , в случае превышения – сделать повторный расчет. Начертить схему расположения заземлителей с указанием основных расчетных параметров защитного заземления.

Сделать выводы по расчету защитного заземления.

### 4.3. Расчет зануления

Цель расчета зануления – определить сечение защитного нулевого провода, удовлетворяющее условию срабатывания максимальной токовой защиты, при известных остальных параметрах сети и заданных параметрах автоматического выключателя или плавкой вставки. Принципиальная схема зануления представлена на рис. 4.2.

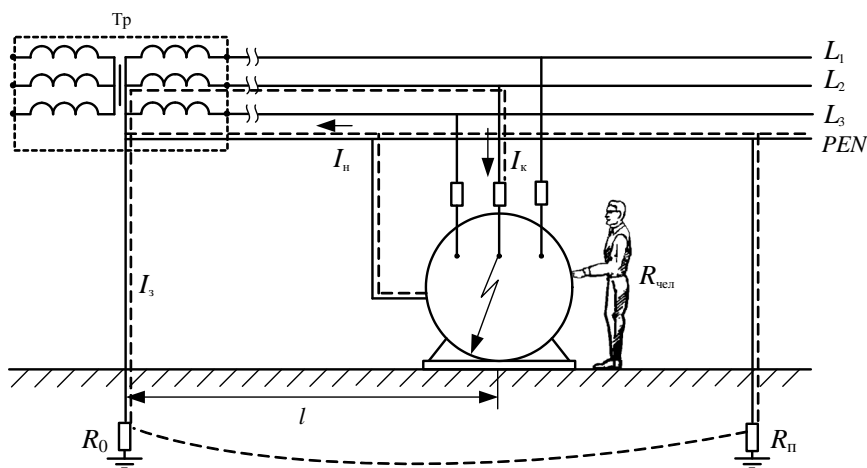


Рис. 4.2. Схема зануления установки



При замыкании на зануленный корпус электроустановки ток однофазного короткого замыкания  $I_k$  складывается из токов двух параллельных участков цепи: 1) по ветви – фазный провод  $L_2$ , обмотки трансформатора Тр, нулевой проводник PEN - протекает ток  $I_n$ , 2) по параллельной ветви - заземление нейтрали  $R_0$ , участок грунта, повторное заземление  $R_n$  - течет ток  $I_3$ . Сопротивление петли «фаза-нуль» обычно не превышает 2 Ом, а сопротивление  $(R_0+R_n)$ , согласно ПУЭ должно быть в пределах 7...28 Ом в зависимости от напряжения сети. Поэтому ток  $I_3$ , протекающий через землю, много меньше тока  $I_n$ , проходящего по нулевому проводнику, и можно считать  $I_k = I_n$ .

Ток однофазного короткого замыкания  $I_k$  рассчитывается по формуле:

$$I_k = k \cdot I_{ном} \quad (4.5)$$

где  $I_{ном}$  – номинальный ток срабатывания устройства защиты (плавкой вставки или автоматического выключателя), А;

$k$  – коэффициент кратности номинального тока.

Согласно ПУЭ значение тока  $I_k$  должно превышать в 3 раза значение номинального тока срабатывания плавкой вставки. При защите сети автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель, коэффициент кратности тока выключателей с номинальным током до 100 А следует принимать равным 1,4, а для прочих – 1,25. Значение  $I_{ном}$  определяется мощностью подключенной электроустановки и выбирается из условия несрабатывания при протекании через них рабочих токов электроустановки. Например, для электродвигателей ток  $I_{ном}$  плавких вставок предохранителей должен в 1,6...3 раза превышать номинальные токи.

### **Методика расчета зануления**

Расчетный ток петли «фаза-нуль» равен отношению напряжения в этой цепи к полному сопротивлению цепи:

$$I_n = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T}{3} + Z_n} \quad (4.6)$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение сети, В;

$Z_T$  – сопротивление трансформатора, Ом;

$Z_n$  – полное сопротивление петли «фаза-нуль», Ом.

Значения  $Z_T$  в зависимости от мощности трансформатора  $P$  и схемы соединения обмоток «звезда-звезда»  $Y/Y_n$  или «треугольник-звезда»  $\Delta/Y_n$  с четвертым нулевым защитным проводником с низкой стороны трансформатора приведены в табл. 4.6.

**Расчетные сопротивления трансформаторов  
при вторичном напряжении 380/220 В<sup>\*)</sup>**

P, кВт	Z <sub>т</sub>		P, кВт	Z <sub>т</sub>	
	Y/Y <sub>н</sub>	Δ/Y <sub>н</sub>		Y/Y <sub>н</sub>	Δ/Y <sub>н</sub>
25	3,110	0,906	250	0,312	0,090
40	1,950	0,562	400	0,195	0,056
63	1,240	0,360	630	0,129	0,042
100	0,800	0,266	1000	0,081	0,029
160	0,487	0,141	1600	0,054	0,017

<sup>\*)</sup> Для трансформаторов с вторичным напряжением 220/128 В Z<sub>т</sub> следует уменьшить в 3 раза.

Полное сопротивление проводников петли «фаза-нуль»:

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(R_{\Phi} + R_{\Pi})^2 + (X_{\Phi} + X_{\Pi} + X_{\Pi})^2}, \quad (4.7)$$

где  $R_{\Phi}$ ,  $R_{\Pi}$  – активные сопротивления фазного и нулевого провода, Ом;  
 $X_{\Phi}$ ,  $X_{\Pi}$  – внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводов, Ом;  
 $X_{\Pi}$  – внешнее индуктивное сопротивление петли «фаза-нуль», Ом.

Для медных и алюминиевых проводников фаз по известным данным: сечению  $S_{\Phi}$  (мм<sup>2</sup>), длине  $l$  (м) и удельному сопротивлению проводника  $\rho$  (Ом·мм<sup>2</sup>/м) (для меди  $\rho = 0,018$ , а для алюминия  $\rho = 0,028$ ) – определяется активное сопротивление фазы  $R_{\Phi}$ :

$$R_{\Phi} = \frac{\rho \cdot l}{S_{\Phi}}. \quad (4.8)$$

Значение внутреннего индуктивного фазного сопротивления  $X_{\Phi}$  для медных и алюминиевых проводников мало, поэтому в формуле (4.7) им можно пренебречь.

Если нулевой защитный проводник выполнен из стали прямоугольного или круглого сечения, то активное сопротивление нулевого провода  $R_{\Pi} = r_1 \cdot l$ , а внешнее индуктивное сопротивление петли  $X_{\Pi} = x_1 \cdot l$ , где  $r_1$  и  $x_1$  – активное и внутреннее индуктивные сопротивления 1 км стального проводника, которые указаны в табл. 4.7. Они зависят от его профиля и площади сечения  $S_{\Pi}$ , а также от ожидаемой плотности тока в нулевом проводнике  $i_{\Pi}$ , (А/мм<sup>2</sup>):

$$i_n = I_k / S_n. \quad (4.9)$$

При выборе сечения нулевого проводника следует обеспечить плотность тока в нулевом проводнике  $i_n = 0,5 \dots 2,0 \text{ А/мм}^2$ .

Таблица 4.7

**Значения  $r_1$  и  $x_1$ , Ом/км стальных проводников при переменном токе ( $f = 50 \text{ Гц}$ )**

Размеры сечения, мм	$S_n, \text{ мм}^2$	Плотность тока в проводнике $i_n, \text{ А/мм}^2$							
		$i_n = 0,5$		$i_n = 1,0$		$i_n = 1,5$		$i_n = 2,0$	
		$r_1$	$x_1$	$r_1$	$x_1$	$r_1$	$x_1$	$r_1$	$x_1$
20x4	80	5,24	3,14	4,20	2,52	3,48	2,09	2,97	1,78
30x4	120	3,66	2,20	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,22
30x5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	1,60	0,98
40x4	160	2,80	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,92
50x4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,74
50x5	250	2,10	1,26	1,60	0,96	1,28	0,77	–	–
60x5	300	1,77	1,06	1,34	0,80	1,08	0,65	–	–

Материал и сечение фазных проводников выбирают исходя из мощности потребителей энергии, а материал и сечение нулевого защитного проводника – должны удовлетворять условию:

$$Z_n \leq 2 \cdot Z_\phi, \quad (4.10)$$

где  $Z_n$  и  $Z_\phi$  – полные сопротивления соответственно нулевого и фазного проводника, Ом.

Внешнее индуктивное сопротивление  $X_n$ , Ом, петли «фаза-нуль», если используется воздушная линия электропередачи и частота тока  $f = 50 \text{ Гц}$ , можно определить по формуле:

$$X_n = 0,1256 \cdot l \cdot \ln(2 \cdot D / d), \quad (4.11)$$

где  $l$  – длина линии, км;

$D$  – расстояние между проводниками линии, м;

$d$  – диаметр проводников, м.

Для грубых расчетов используют формулу  $X_n = 0,6 l$ , что соответствует  $D = 1 \text{ м}$ . Для уменьшения значения  $X_n$  нулевой защитный проводник следует прокладывать рядом с фазным. Если нулевой проводник является четвертой жилой кабеля или металлической трубой, в которой расположены фазные проводники, то  $X_n$  мало по величине и им можно пренебречь, в формуле (4.7).

Если источник питания и линия электропередачи заданы, то необходимо выбрать соответствующий автоматический выключатель, используя приведенные выше рекомендации. Если задан автоматический выключатель, тогда необходимо определить сечение нулевого провода. В обоих случаях проводится расчет на срабатывание выключателя. Если в результате расчета условие:

$$I_n \geq I_k \quad (4.12)$$

выполняется, то расчет окончен, а если не выполняется, то его повторяют, выполнив одно из мероприятий: изменяют параметры выключателя; утолщают нулевой защитный проводник; изменяют параметры фазных проводников.

**Задача 4.2.** Рассчитать параметры зануления распределительного щитка лаборатории, к которому подведена линия от понижающего трансформатора 10/0,4 кВ.

Определить либо параметры нулевого защитного проводника из стали (например, вариант 1), удовлетворяющие условию срабатывания максимальной токовой защиты при заданных параметрах устройства защиты; сечение нулевого проводника выбирать в пределах, указанных в табл. 4.6; либо подобрать параметры устройства защиты (например, вариант 2). Номинальные токи вставок автоматических выключателей (АВ) следует принимать: 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80 А; для предохранителей (П): 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160 А.

Варианты остальных исходных данных приведены в табл. 4.8.

#### *Алгоритм расчета зануления*

*А) для вариантов с заданными параметрами устройств защиты (например, вариант 1).*

1. Определить по формуле (4.5) значение тока однофазного короткого замыкания  $I_k$ .

2. По табл. 4.6 найти сопротивление обмоток трансформатора  $Z_T$ .

3. По формуле (4.8) найти активное сопротивление фазного проводника  $R_\phi$  при заданных значениях  $l$  и  $S_\phi$ .

4. По формуле (4.9) рассчитать плотность тока в нулевом проводнике  $i_n$ . Выбрав размеры сечения нулевого проводника, определить по таблице 4.7 значения  $r_1$  и  $x_1$ , рассчитать значения активного  $R_n$  и внутреннего индуктивного  $X_n$  сопротивления нулевого проводника.

5. Рассчитать по формуле  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  полное сопротивление нулевого и фазного проводников и проверить условие (4.10); при необходимости изменить сечение нулевого проводника.

Таблица 4.8

## Варианты исходных данных к задаче 4.2

№ вар	Параметры трансформатора		Длина линии, м	Напряжение, $U_{\phi}$ , В	Параметры «фазы»		Параметры «нуля»		Параметры устройств защиты <sup>*)</sup>	
	Мощность, Р, кВ·А	Соединение обмоток			Сечение, мм <sup>2</sup> из Cu	из Al	$S_n$ , мм <sup>2</sup>	D, м	тип	$I_{ном}$ , А
1	400	Y/Y <sub>n</sub>	400	380	12	–	–	–	П	80
2	630	Δ/Y <sub>n</sub>	300	380	–	15	–	160	–	–
3	160	Δ/Y <sub>n</sub>	200	220	10	–	–	120	–	–
4	400	Y/Y <sub>n</sub>	450	380	–	10	–	–	AB	63
5	100	Δ/Y <sub>n</sub>	250	220	15	–	–	–	П	40
6	1000	Y/Y <sub>n</sub>	325	380	–	20	–	150	–	–
7	160	Y/Y <sub>n</sub>	150	220	16	–	–	300	–	–
8	63	Δ/Y <sub>n</sub>	375	220	–	8	–	–	AB	40
9	250	Y/Y <sub>n</sub>	200	380	12	–	–	–	П	80
10	630	Y/Y <sub>n</sub>	125	220	–	14	–	200	–	–
11	40	Δ/Y <sub>n</sub>	175	220	10	–	–	160	–	–
12	160	Δ/Y <sub>n</sub>	300	220	–	5	–	–	AB	80
13	630	Y/Y <sub>n</sub>	150	380	16	–	–	–	П	145
14	400	Δ/Y <sub>n</sub>	250	220	–	20	–	250	–	–
15	1000	Y/Y <sub>n</sub>	375	380	17	–	–	300	–	–
16	250	Δ/Y <sub>n</sub>	125	220	–	16	–	–	П	110
17	63	Δ/Y <sub>n</sub>	350	220	–	10	–	–	AB	50
18	630	Y/Y <sub>n</sub>	400	380	14	–	–	250	–	–
19	100	Δ/Y <sub>n</sub>	125	220	–	12	–	300	–	–
20	630	Y/Y <sub>n</sub>	200	380	12	–	–	–	П	125
21	400	Y/Y <sub>n</sub>	275	220	–	8	–	–	AB	50
22	250	Δ/Y <sub>n</sub>	400	380	12	–	–	200	–	–
23	100	Δ/Y <sub>n</sub>	125	220	–	10	–	120	–	–
24	630	Y/Y <sub>n</sub>	100	380	10	–	–	–	П	125
25	40	Δ/Y <sub>n</sub>	200	220	–	5	–	80	–	–

<sup>\*)</sup> Тип устройства защиты: П – предохранитель, АВ – автоматический выключатель;  $I_{ном}$  – номинальный ток плавкой вставки предохранителя или номинальный ток вставки автоматического выключателя.

6. Определить внешнее индуктивное сопротивление проводников согласно формуле (4.11) при  $d = 2 \cdot \sqrt{S_{\phi} / \pi}$ .

7. Рассчитать по формуле (4.7) полное сопротивление петли «фаза – нуль»  $Z_{п}$ .

8. По формуле (4.6) найти значение  $I_{н}$  и проверить условие (4.12). Если условие не выполняется, повторить расчет с другими значениями сечения нулевого проводника.

*Б) для вариантов с заданными параметрами нулевого проводника (например, вариант 2).*

1. По табл. 4.6 найти сопротивление обмоток трансформатора  $Z_{т}$ .

2. Определить по формуле (4.8) активное сопротивление фазного проводника  $R_{\phi}$  при заданных значениях  $l$  и  $S_{\phi}$ .

3. Выбрать тип устройства защиты и номинальный ток, пользуясь рекомендациями в условии задачи. Определив по формуле (4.5) значение тока  $I_{к}$ , рассчитать плотность тока в нулевом проводнике  $i_{н}$  по формуле (4.9). Определить по табл. 4.7 значения  $r_1$  и  $x_1$  и рассчитать значения активного  $R_{н}$  и внутреннего индуктивного  $X_{н}$  сопротивления нулевого проводника.

4. Рассчитать по формуле  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  полное сопротивление нулевого и фазного проводников и проверить условие (4.10); при необходимости изменить номинальный ток устройства защиты.

5. Определить внешнее индуктивное сопротивление проводников согласно формуле (4.11) при  $d = 2 \cdot \sqrt{S_{\phi} / \pi}$ .

6. Рассчитать по формуле (4.7) полное сопротивление петли «фаза – нуль»  $Z_{п}$ .

7. По формуле (4.6) найти значение  $I_{н}$  и проверить условие (4.12). Если условие не выполняется, повторить расчет с другими параметрами устройства защиты.

Сделать выводы по расчету зануления.

## 5. РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 5.1. Основные понятия и определения

В научных исследованиях и бытовой технике часто используют устройства, являющиеся источником ионизирующего излучения (ИИ) и представляющие опасность для здоровья человека. К ним относятся электронные микроскопы, мониторы персональных компьютеров (ПК), дифрактометры рентгеновские общего назначения (ДРОН), томографы и т.д.

**Ионизирующими** называют излучения, взаимодействие которых с окружающей средой приводит к ее ионизации, то есть образованию электрических зарядов противоположных знаков.

Существуют два вида ионизирующих излучений:

- *корпускулярное*, состоящее из частиц с массой покоя, отличной от нуля (альфа-, бета-, нейтронное излучение);
- *фотонное* – электромагнитное излучение (ЭМИ) (гамма- и рентгеновское излучение).

**Альфа-излучение** ( $\alpha$ -излучение) представляет собой поток ядер атомов гелия, испускаемых веществом при радиоактивном распаде ядер или при ядерных реакциях. Энергия  $\alpha$ -частиц не превышает нескольких МэВ ( $1 \text{ эВ} = 1,60206 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). Излучаемые  $\alpha$ -частицы движутся в среде практически прямолинейно со скоростью порядка  $2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ . Вследствие своей большой массы эти частицы быстро теряют свою энергию при взаимодействии с веществом. Это обуславливает их низкую проникающую способность и высокую удельную ионизацию:  $\alpha$ -частица при движении в воздушной среде образует на 1 см пробега несколько десятков тысяч пар ионов.

**Бета-излучение** ( $\beta$ -излучение) представляет собой поток электронов или позитронов, возникающих при радиоактивном распаде. Отрицательно заряженные  $\beta$ -частицы являются электронами ( $\beta^-$ ), положительно заряженные – позитронами ( $\beta^+$ ). Масса  $\beta$ -частицы в 7,5 тысяч раз меньше массы  $\alpha$ -частицы. В зависимости от природы источника  $\beta$ -излучений скорость этих частиц может достигать 0,99 скорости света. Энергия  $\beta$ -частиц составляет несколько МэВ, длина пробега в воздухе порядка 18 м, а в мягких тканях человеческого тела –  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .  $\beta$ -частицы имеют более высокую проникающую способность, чем  $\alpha$ -частицы (из-за меньшей массы и заряда).

**Нейтронное излучение** представляет собой поток ядерных частиц, не имеющих электрического заряда. В зависимости от энергии различают медленные нейтроны (с энергией менее 1 кэВ), нейтроны промежуточных энергий (от 1 до 500 кэВ) и быстрые нейтроны (от 500 кэВ до 20 МэВ). Проникающая способность нейтронов зависит от их энергии и атомной массы вещества, с которыми они взаимодействуют. Нейтронное излучение обладает высокой проникающей способностью (она существенно выше, чем у  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц) и представляет для человека наибольшую опасность из всех видов корпускулярного излучения.

**Гамма-излучение** ( $\gamma$ -излучение) представляет собой высокочастотное электромагнитное излучение с высокой энергией (0,01...3 МэВ) и малой длиной волны (от  $2 \cdot 10^{-2}$  нм в сторону коротких волн). Практически не имеет массы и заряда.  $\gamma$ -излучение испускается при ядерных превращениях радионуклидов или аннигиляции (взаимодействии) частиц.  $\gamma$ -излучение обладает высокой проникающей способностью (за счет высокой энергии и малой длины волны). Ионизирующая способность  $\gamma$ -излучения меньше, чем у  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения.  $\gamma$ -лучи не отклоняются в электрических и магнитных полях.

**Рентгеновское излучение** представляет собой совокупность *тормозного* и *характеристического излучения* с длиной волны равной  $10^{-7} \dots 10^{-14}$  мкм и энергией квантов 1 кэВ...1 МэВ. *Тормозное рентгеновское излучение* – ЭМИ с непрерывным спектром, возникающее при торможении веществом быстрых электронов и изменении в этой связи кинетической энергии заряженных частиц. *Характеристическое излучение* – ЭМИ с дискретным спектром, возникающее при дискретном изменении энергетического состояния атома. Рентгеновское излучение может быть получено в специальных рентгеновских трубках, в ускорителях электронов, а также в среде, окружающей источник  $\beta$ -излучения. Это излучение, как и  $\gamma$ -излучение, обладает большой глубиной проникновения в среду и малой ионизирующей способностью.

Энергетические диапазоны рентгеновского излучения и  $\gamma$ -излучения перекрываются в широкой области энергий. Оба типа излучения являются ЭМИ и при одинаковой энергии фотонов – эквивалентны. Терминологическое различие этих видов излучения лежит в способе их возникновения.

Ионизирующие излучения оказывают сильное воздействие на биологический объект. Их действие оценивается дозами излучения, являющимися количественными параметрами, позволяющими оценить степень и форму лучевых поражений организма человека.

Основополагающей дозиметрической величиной является поглощенная доза, показывающая величину энергии ИИ, переданной веществу (живому организму).



*Поглощенная доза*  $D_{T,R}$  – отношение средней энергии  $dE_R$  (Дж), переданной определенным видом ионизирующего излучения  $R$  органу или ткани  $T$  в элементарном объеме, к массе этого органа или ткани  $dm_T$  (кг) в этом объеме. Единица измерения – Гр (Грей). 1 Гр=1 Дж/кг=100 рад (рад – внесистемная единица измерения).

$$D_{T,R} = \frac{dE_R}{dm_T}. \quad (5.1)$$

Поглощенная доза не отражает биологический эффект облучения. Для учета различного биологического эффекта облучения разными видами ИИ введена эквивалентная доза.

*Эквивалентная доза*  $H_T$  – сумма произведений поглощенной дозы в органе или ткани  $T$  на соответствующие взвешивающие коэффициенты  $W_R$  для данных видов излучения  $R$ . Единица измерения – Зв (Зиверт). 1 Зв = 100 бэр (бэр – биологический эквивалент рентгена (или рада) – внесистемная единица измерения).

$$H_T = \sum_R (W_R \cdot D_{T,R}), \quad (5.2)$$

где  $D_{T,R}$  – поглощенная доза в органе или ткани  $T$  (гонады, костный мозг, желудок, легкие, печень, кожа и др.) определенного вида ионизирующего излучения  $R$ , Гр;

$W_R$  – взвешивающий коэффициент для данного вида излучения  $R$  (прил. 5.1), учитывающий относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов.

Для оценки риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их чувствительности к ИИ используют эффективную дозу.

*Эффективная доза*  $E$  – сумма произведений эквивалентной дозы  $H_T$  в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты  $W_T$ . Единица измерения – Зв (Зиверт).

$$E = \sum_T (W_T \cdot H_T), \quad (5.3)$$

где  $H_T$  – эквивалентная доза в органе или ткани  $T$ , Зв;

$W_T$  – взвешивающий коэффициент для данного вида ткани  $T$  (прил. 5.2), учитывающий различную чувствительность к ИИ разных органов и тканей. Для организма в целом принимается равным 1.

Для рентгеновского и  $\gamma$ -излучения часто применяют так называемую экспозиционную дозу.

*Экспозиционная доза*  $X$  – отношение полного заряда всех ионов одного знака, созданных в элементарном объеме воздуха в условиях электронного равновесия  $dQ$  (Кл) к массе воздуха  $dm$  (кг) в этом объеме. Единица измерения – Кл/кг. 1 Кл/кг=3876 Р (рентген – внесистемная единица измерения).

$$X = \frac{dQ}{dm}. \quad (5.4)$$

Ионизирующее излучение образует в среде определенное количество ионов. Так как поглощенная энергия расходуется на ионизацию среды, то для измерения ее необходимо подсчитать число пар ионов, образующихся под действием излучения. Однако измерить число пар ионов непосредственно в глубине тканей живого организма сложно. В связи с этим для количественной характеристики действующего на объект излучения, определяют сначала экспозиционную дозу в воздухе, а затем расчетным путем определяют поглощенную дозу для тканей и органов организма. При облучении организма рентгеновским или  $\gamma$ -излучением при экспозиционной дозе равной 1 Кл/кг – ткани организма поглощают 37 Дж/кг.

При определении действия ИИ на какую-либо среду (особенно при облучении живого организма) необходимо учитывать не только дозу, но и время, за которое она получена. Поэтому введено понятие мощность дозы.

*Мощность дозы* – приращение соответствующей дозы за единицу времени. Имеет размерность соответствующей дозы (поглощенной, эквивалентной и т.п.), отнесенной к единице времени. Допускается использование различных специальных единиц (например, Зв/ч, бэр/мин и др.).

Так, например, *мощность экспозиционной дозы*  $P_X$  (Кл/(кг·с)):

$$P_X = \frac{dX}{dt}. \quad (5.5)$$

В СанПиН 2.6.1.2523–09 «Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009» [1] установлены значения предельно допустимых доз (ПДД) излучения для персонала, непосредственно работающего с источниками ИИ (группа А), персонала, находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б) и населения (табл. 5.1).

## Основные пределы доз

Нормируемые величины	Персонал (группа А)*	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза, мЗв за год:		
в хрусталике глаза	150	15
коже	500	50
кистях и стопах	500	50

\*) ПДД для персонала группы Б равны  $\frac{1}{4}$  значений для персонала группы А.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) – 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв.

Одним из наиболее эффективных способов защиты от ИИ является экранирование. Выбор защитного экрана следует производить в зависимости от вида ИИ.

Для защиты от  $\alpha$ -излучения применяют экраны из стекла, плексигласа толщиной в несколько миллиметров. Достаточной защитой от  $\alpha$ -излучения является слой воздуха в несколько сантиметров.

В случае  $\beta$ -излучения используют материалы с малой атомной массой (например, алюминий), а чаще комбинированные (со стороны источника – материал с малой, а затем далее от источника применяют материал с большей атомной массой).

Для защиты от нейтронного излучения применяют бериллий, графит и материалы, содержащие водород (парафин, вода). Для защиты от нейтронных потоков с малой энергией широко применяются бор и его соединения. Также для защиты от нейтронов можно использовать бетон.

В случае воздействия  $\gamma$ -излучения и нейтронных потоков применяются комбинированные экраны: смеси тяжелых металлов с водой или водородосодержащими материалами, а также комбинации слоев тяжелых и легких материалов (свинец – вода, свинец – полиэтилен, железо – вода и др. пары и комбинации).

Фотонные излучения обладают наименьшей ионизирующей способностью и наибольшей проникающей способностью. Обеспечить

полную защиту от фотонных излучений не представляется возможным. Защитные устройства позволяют лишь ослабить их интенсивность в любое число раз. Для защиты от  $\gamma$ -излучений применяют материалы с большой атомной массой и высокой плотностью (свинец, вольфрам), а также более легкие материалы, являющиеся менее дефицитными и более дешевыми (сталь, чугун, сплавы меди). Смотровые системы изготавливают из специальных прозрачных материалов, например, свинцового стекла. Стационарные экраны выполняются из бетона и баритобетона. В качестве защищающего от  $\gamma$ -лучей материала применяют также свинцовую резину.

Эффективность экранирования принято оценивать по кратности ослабления ИИ. *Кратность ослабления излучения  $K$*  показывает во сколько раз необходимо уменьшить значение дозы ИИ (или мощности дозы), чтобы получить предельно допустимые величины.

Так, например, кратность ослабления (для эффективной дозы) составит:

$$K = \frac{E}{\text{ПДД}}, \quad (5.6)$$

где  $E$  – эффективная доза излучения, Зв;

ПДД – предельно допустимая эффективная доза (табл. 5.1), Зв.

## **5.2. Расчет защитного экрана при работе устройств с рентгеновской трубкой**

При работе устройств с рентгеновской трубкой для защиты персонала от ИИ устанавливают различные экраны (свинец, бетон, сталь и др.). Расчет экрана проводится по свинцовому эквиваленту.

Формула (5.6) для определения эффективности экранирования (кратности ослабления) рентгеновского излучения  $K$  в случае работы с рентгеновской трубкой имеет вид [2]:

$$K = \frac{K_R \cdot W \cdot m}{R^2 \cdot \lambda \cdot \text{ПДД}}, \quad (5.7)$$

где  $K_R$  – радиационный выход – отношение мощности воздушной кермы в первичном пучке рентгеновского излучения на расстоянии 1 м от фокуса трубки, умноженной на квадрат этого расстояния, к силе анодного тока. Единица измерения – (мГр·м<sup>2</sup>)/(мА·мин).  $K_R$  может быть определен по табл. 5.2;

$W$  – рабочая нагрузка рентгеновской трубки, (мА·мин)/нед.;

$m$  – стандартизованная продолжительность работы рентгеновской трубки в течение года при односменной работе персонала группы А,  $m = 50$  нед. (при 30-часовой рабочей неделе);

$R$  – расстояние от анода рентгеновской трубки до облучаемого объекта, м;

$\lambda$  – коэффициент перехода от величины эффективной дозы к значению поглощенной дозы в воздухе, мГр/мЗв. Для расчета радиационной защиты с учетом двукратного запаса по кратности ослабления рентгеновского излучения значение  $\lambda$  принимается равным 1;

ПДД – предельно допустимая годовая эффективная доза, мЗв (табл. 5.1).

Таблица 5.2

**Значения радиационного выхода  $K_R$**

Анодное напряжение $U_{\max}$ , кВ	50	75	100	150	200	250
Радиационный выход, $K_R$ (мГр·м <sup>2</sup> )/(мА·мин)	3,0	6,3	9	18	25	20

Толщина защитного экрана из свинца (свинцовый эквивалент)  $d$  (мм), экранирующего анод рентгеновской трубки, определяется в зависимости от напряжения на рентгеновской трубке  $U_{\max}$  (кВ) и показателя кратности ослабления рентгеновского излучения  $K$  по прил. 5.3. Свинцовые эквиваленты строительных материалов, используемые для защиты от рентгеновского излучения (сталь, бетон, кирпич и др.) приведены в прил. 5.4.

**Задача 5.1.** Рассчитать требуемую кратность ослабления мощности дозы рентгеновского излучения и определить толщину экрана из свинца и альтернативного строительного материала, обеспечивающего уменьшение мощности дозы рентгеновского излучения до нормативных значений. Исходные данные приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

**Варианты исходных данных к задаче 5.1**

№ варианта	Максимальное анодное напряжение на рентгеновской трубке $U_{\max}$ , кВ	Рабочая нагрузка рентгеновской трубки $W$ , (мА·мин)/нед.	Расстояние до объекта $R$ , м
1	100	200	8
2	75	400	8
3	150	500	8
4	50	1000	7

№ варианта	Максимальное анодное напряжение на рентгеновской трубке $U_{\max}$ , кВ	Рабочая нагрузка рентгеновской трубки $W$ , (мА·мин)/нед.	Расстояние до объекта $R$ , м
5	200	100	6
6	250	300	8
7	150	2000	8
8	75	1000	3
9	200	400	8
10	250	1500	8
11	75	500	8
12	50	250	7
13	100	600	5
14	200	750	5
15	250	400	8
16	75	1000	8
17	150	150	5
18	250	500	6
19	200	650	8
20	100	2000	6
21	50	150	7
22	250	800	6
23	75	200	7
24	150	450	4
25	100	550	8

**Алгоритм расчета защитных экранов  
от рентгеновского излучения**

1. По заданной величине максимального анодного напряжения  $U_{\max}$  (кВ) по табл. 5.2 определить величину радиационного выхода  $K_R$  (мГр·м<sup>2</sup>)/(мА·мин).

2. По табл. 5.1 определить годовую эффективную ПДД (мЗв) для персонала (группы А).

3. По формуле (5.7) рассчитать требуемую кратность ослабления мощности дозы излучения  $K$ .

4. Определить толщину защитного экрана из свинца (свинцового эквивалента)  $d$  (мм), обеспечивающего уменьшение мощности дозы рентгеновского излучения до нормативного значения, по кратности ослабления рентгеновского излучения  $K$  и напряжению на рентгеновской трубке  $U_{\max}$  (кВ), по прил. 5.3.

5. Предложить альтернативный строительный материал и определить его толщину  $d$  (мм) по прил. 5.4.

### 5.3. Оценка эффективности защитных мероприятий от излучений монитора с электронно-лучевой трубкой

Напряжение на пластинах развертки мониторов с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ)  $U > 1$  кВ, при этом образуется мягкое рентгеновское излучение при выбивании ускоренным пучком электронов вторичных электронов из анода. Кроме того, электроны, эмитированные катодом и ускоренные вторым анодом, ударяясь о линзу кинескопа, создают тормозное излучение.

Для мягкого рентгеновского излучения (в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^2$  МэВ) мощность экспозиционной дозы  $P_X$  (Р/с) может быть определена по формуле:

$$P_X = 7 \cdot \frac{I}{R^2} \cdot 10^{-5 \left( \frac{\mu \cdot d}{2,3} \right)}, \quad (5.8)$$

где  $I$  – сила анодного тока в ЭЛТ, мА;

$R$  – расстояние от ЭЛТ до облучаемого объекта, см;

$\mu$  – коэффициент линейного поглощения материала экрана,  $\text{см}^{-1}$ ;

$d$  – толщина экрана (стекла ЭЛТ), см.

Величину  $\mu$  в диапазоне энергии  $E \leq 10^{-2}$  МэВ можно вычислить по формуле:

$$\mu = 24,6 \cdot \rho, \quad (5.9)$$

где  $\rho$  – плотность материала экрана,  $\text{г/см}^3$ .

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [3] мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана и корпуса видеодисплейного терминала (ВДТ) (на электронно-лучевой трубке) при любых положениях регулировочных устройств не должна превышать 100 мкР/ч.

**Задача 5.2.** Проверить обеспечивает ли защиту от ионизирующего излучения экран (стекло ЭЛТ) толщиной  $d$  (мм), если сила анодного тока ЭЛТ составляет  $I$  (мА). При расчетах принять плотность стекла  $\rho_{\text{стекла}} = 2,5 \text{ г/см}^3$ . Варианты заданий приведены в табл. 5.4.

Варианты исходных данных к задаче 5.2

№ варианта	Сила анодного тока $I$ , мА	Толщина экрана $d$ , мм
1	2,0	2,5
2	2,5	2,6
3	4,0	2,4
4	1,0	2,0
5	2,5	2,4
6	3,0	2,5
7	2,5	2,2
8	3,5	2,3
9	1,5	2,1
10	2,0	2,3
11	1,0	2,6
12	2,5	2,5
13	1,5	2,6
14	3,5	2,5
15	2,0	2,6
16	2,0	2,2
17	3,0	2,6
18	1,0	2,5
19	2,5	2,3
20	2,0	2,4
21	4,0	2,0
22	1,5	2,2
23	3,5	2,1
24	3,0	2,4
25	1,0	2,3

**Алгоритм расчета эффективности  
защитного экрана при работе с ЭЛТ**

1. Определить коэффициент линейного поглощения материала экрана  $\mu$  ( $\text{см}^{-1}$ ) по формуле (5.9).
2. По формуле (5.8) определить мощность экспозиционной дозы  $P_X$  (Р/с) на расстоянии 0,05 м от экрана и корпуса ВДТ (на электронно-лучевой трубке).
3. Сравнить полученную мощность экспозиционной дозы  $P_X$  (Р/с) с ПДД и сделать вывод об эффективности экранирования.

**5.4. Расчет защитных мероприятий  
при работе с радиоактивными изотопами**

Экспозиционная доза  $X$  (Р) на расстоянии  $R$  (см) от точечного источника в отсутствии защитного экрана определяется из соотношений:



$$X = \frac{A \cdot K_{\gamma} \cdot t}{R^2}, \quad X = \frac{M \cdot 8,4 \cdot t}{R^2} \quad (5.10)$$

где  $A$  – активность источника (ожидаемое число элементарных радиоактивных распадов в единицу времени), мКи. Единица измерения активности – Бк (беккерель), внесистемная единица измерения – Ки (кюри),  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ;

$K_{\gamma}$  – ионизационная  $\gamma$ -постоянная  $\gamma$ -излучателя (табл. 5.5),  $(\text{Р} \cdot \text{см}^2)/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$ ;

$t$  – время работы с источником излучения, ч;

$R$  – расстояние от источника излучения до защищаемого объекта, см;

$M$  –  $\gamma$ -эквивалент радионуклида (табл. 5.5), мг-экв Ra;

$8,4 (\text{Р} \cdot \text{см}^2)/(\text{ч} \cdot \text{мг-экв Ra})$  –  $\gamma$ -постоянная радия, находящегося в равновесии с основными дочерними продуктами распада за платиновым фильтром толщиной 0,5 мм.

Данные о некоторых  $\gamma$ -активных изотопах приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

**Характеристики  $\gamma$ -излучения некоторых радиоактивных изотопов**

Изотоп	Период полураспада, $T_{1/2}$	Энергия $\gamma$ -излучения $h_{\nu}$ , МэВ	Ионизационная $\gamma$ -постоянная $K_{\gamma}$ , $(\text{Р} \cdot \text{см}^2)/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$	$\gamma$ -эквивалент изотопа $M$ , мг-экв Ra
Натрий–22 $\text{Na}_{11}^{22}$	2,58 года	1,275	6,58	1,420
		0,511	5,31	
Кобальт–60 $\text{Co}_{27}^{60}$	5,27 года	1,333	6,82	1,540
		1,172	6,11	
Европий–152 $\text{Eu}_{63}^{152}$	12,2 года	1,210	0,127	0,600
		1,085	0,754	
Европий–154 $\text{Eu}_{63}^{154}$	16 лет	0,998	0,757	0,740
		0,123	0,078	
Европий–155 $\text{Eu}_{63}^{155}$	1,7 года	0,132	0,034	0,0100
		0,061	0,108	
Радий–226 $\text{Ra}_{88}^{226}$	1622 года	2,090	0,010	1,110
		1,050	0,028	
		0,184	0,011	
Цезий–137 $\text{Cs}_{55}^{137}$	26,6 года	0,661	3,550	0,420
Америций–241 $\text{Am}_{95}^{241}$	498 лет	0,060	0,140	0,024
		0,043	0,060	

Толщина защитного экрана  $d$  (см) из различных материалов в зависимости от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения приведена в прил. 5.5 – 5.7.

**Задача 5.3.** Рабочий изотопной лаборатории работает  $t$  часов в году с источником ионизирующих излучений с энергией  $\gamma$ -излучения  $h_\gamma$  (МэВ). Требуется определить либо активность  $A$  (мКи) радионуклида, с которым он может работать без защитного экрана на расстоянии  $R$  (м) от источника излучения (варианты 1...13), либо расстояние  $R$  (м), на котором радиоактивное облучение соответствует предельно допустимому (варианты 14...25). Варианты заданий приведены в табл. 5.6

Таблица 5.6

**Варианты исходных данных к задаче 5.3**

Номер варианта	Изотоп	Энергия $\gamma$ -излучения $h_\gamma$ , МэВ	Время работы с источником излучения за год $t$ , ч	Расстояние от источника $R$ , м
1	Na <sub>11</sub> <sup>22</sup>	1,275	1800	1,0
2	Na <sub>11</sub> <sup>22</sup>	0,511	1200	0,5
3	Co <sub>27</sub> <sup>60</sup>	1,333	1000	0,7
4	Co <sub>27</sub> <sup>60</sup>	1,172	1450	1,5
5	Eu <sub>63</sub> <sup>152</sup>	1,210	1600	1,7
6	Eu <sub>63</sub> <sup>152</sup>	1,085	1250	1,6
7	Eu <sub>63</sub> <sup>154</sup>	0,998	1500	2,0
8	Eu <sub>63</sub> <sup>154</sup>	0,123	1650	0,7
9	Eu <sub>63</sub> <sup>155</sup>	0,132	1400	1,0
10	Eu <sub>63</sub> <sup>155</sup>	0,061	1300	1,5
11	Ra <sub>88</sub> <sup>226</sup>	2,090	1750	1,2
12	Ra <sub>88</sub> <sup>226</sup>	1,050	1100	2,0
13	Ra <sub>88</sub> <sup>226</sup>	0,184	1700	0,5
14	Na <sub>11</sub> <sup>22</sup>	1,275	1000	-
15	Na <sub>11</sub> <sup>22</sup>	0,511	1800	-
16	Co <sub>27</sub> <sup>60</sup>	1,333	1750	-
17	Co <sub>27</sub> <sup>60</sup>	1,172	1300	-
18	Eu <sub>63</sub> <sup>152</sup>	1,210	1400	-
19	Eu <sub>63</sub> <sup>152</sup>	1,085	1800	-
20	Cs <sub>55</sub> <sup>137</sup>	0,661	1200	-
21	Eu <sub>63</sub> <sup>154</sup>	0,123	1600	-

Номер варианта	Изотоп	Энергия $\gamma$ -излучения $h_\gamma$ , МэВ	Время работы с источником излучения за год $t$ , ч	Расстояние от источника $R$ , м
22	$\text{Eu}_{63}^{155}$	0,132	1000	-
23	$\text{Eu}_{63}^{155}$	0,061	1700	-
24	$\text{Ra}_{88}^{226}$	2,090	1500	-
25	$\text{Am}_{95}^{241}$	0,060	1100	-

**Алгоритм расчета безопасных параметров работы с радиоактивными изотопами**

1. Для заданного изотопа с энергией  $\gamma$ -излучения  $h_\gamma$  (МэВ) по табл. 5.5 определить либо ионизационную  $\gamma$ -постоянную  $\gamma$ -излучателя  $K_\gamma$  (Р·см<sup>2</sup>)/(ч·мКи) (варианты 1...13), либо  $\gamma$ -эквивалент радионуклида  $M$  (мг-экв Ra) (варианты 14...25).

2. По табл. 5.1 определить годовую эффективную ПДД (мЗв) (персонал группы А). Учитывая, что 1 Зв = 100 Р (приближенно), выразить ПДД в Рентгенах.

3. Определить по формулам (5.10) либо активность  $A$  (мКи) радионуклида, с которым он может работать без защитного экрана (варианты 1...13), либо расстояние  $R$  (м), на котором радиоактивное облучение соответствует предельно допустимому (варианты 14...25).

**Задача 5.4.** Определить толщину защитного экрана  $d$  (см) из заданного материала М1 для рабочего места (персонал группы А) при работе с изотопом с энергией  $\gamma$ -излучения  $h_\gamma$  (МэВ). Время работы  $t$  часов в году, расстояние от источника излучения  $R$  (м). Как изменится толщина экрана, если вместо материала М1 для защиты использовать материал М2? Варианты заданий приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

**Варианты исходных данных к задаче 5.4**

Номер варианта	Изотоп	Энергия $\gamma$ -излучения $h_\gamma$ , МэВ	Время работы с источником излучения за год $t$ , ч	Расстояние от источника $R$ , м	Материал экрана М1	Материал экрана М2
1	$\text{Eu}_{63}^{152}$	1,085	1250	1,6	свинец	железо
2	$\text{Eu}_{63}^{155}$	0,132	1800	2,1	бетон	свинец
3	$\text{Cs}_{55}^{137}$	0,661	1750	1,9	железо	свинец
4	$\text{Ra}_{88}^{226}$	2,090	1750	1,1	железо	свинец

Номер варианта	Изотоп	Энергия $\gamma$ -излучения $h_\gamma$ , МэВ	Время работы с источником излучения за год $t$ , ч	Расстояние от источника $R$ , м	Материал экрана М1	Материал экрана М2
5	$\text{Co}_{27}^{60}$	1,172	1400	1,4	свинец	железо
6	$\text{Co}_{27}^{60}$	1,172	1750	1,0	свинец	железо
7	$\text{Am}_{95}^{241}$	0,060	1400	0,8	железо	бетон
8	$\text{Cs}_{55}^{137}$	0,661	1450	1,4	железо	свинец
9	$\text{Am}_{95}^{241}$	0,060	1100	2,0	бетон	железо
10	$\text{Cs}_{55}^{137}$	0,661	1000	1,0	свинец	железо
11	$\text{Eu}_{63}^{155}$	0,061	1300	1,5	бетон	железо
12	$\text{Cs}_{55}^{137}$	0,661	1050	1,4	железо	свинец
13	$\text{Ra}_{88}^{226}$	0,184	1500	1,7	бетон	железо
14	$\text{Eu}_{63}^{154}$	0,998	1000	0,6	свинец	железо
15	$\text{Eu}_{63}^{152}$	1,210	1650	1,7	железо	свинец
16	$\text{Eu}_{63}^{154}$	0,123	1650	0,7	железо	бетон
17	$\text{Eu}_{63}^{155}$	0,132	1650	0,7	свинец	бетон
18	$\text{Na}_{11}^{22}$	1,275	1500	0,9	свинец	железо
19	$\text{Na}_{11}^{22}$	1,275	1350	0,6	железо	свинец
20	$\text{Co}_{27}^{60}$	1,333	1000	1,8	железо	свинец
21	$\text{Ra}_{88}^{226}$	1,050	1000	2,0	свинец	железо
22	$\text{Ra}_{88}^{226}$	1,050	1100	1,0	железо	свинец
23	$\text{Am}_{95}^{241}$	0,043	1800	0,5	бетон	свинец
24	$\text{Na}_{11}^{22}$	0,511	1200	2,2	свинец	железо
25	$\text{Eu}_{63}^{154}$	0,998	1200	0,5	железо	свинец

**Алгоритм расчета защитных экранов  
при работе с радиоактивными изотопами**

1. Для заданного изотопа с энергией  $\gamma$ -излучения  $h_\gamma$ , (МэВ) по табл. 5.5 определить  $\gamma$ -эквивалент радионуклида  $M$  (мг-экв Ra).
2. Рассчитать экспозиционную дозу  $X$  (Р) по формуле (5.10).
3. Определить по табл. 5.1 годовую эффективную ПДД (мЗв) (персонал группы А), считая (приближенно), что  $1 \text{ Зв} = 100 \text{ Р}$ , выразить ПДД в Рентгенах.

4. По формуле (5.6) определить кратность ослабления дозы излучения  $K$ .

5. В зависимости от кратности ослабления  $K$  и энергии  $\gamma$ -излучения  $h_\gamma$  (МэВ) по прил. 5.5 – 5.7 найти необходимую толщину защиты  $d$  (см) из предлагаемого материала М1.

6. Найти толщину защитного экрана  $d$  (см) из материала М2. Сравнить полученные значения и сделать вывод.

#### **5.4. Расчет толщины защитного экрана от нейтронов**

Наиболее широкое применение в настоящее время находят нейтронные источники, представляющие собой спрессованную смесь  $\alpha$ -активного вещества с порошком металлического бериллия Ве или бора В.  $\alpha$ -излучателями обычно являются полоний Po, радий Ra и плутоний Pu.

Ослабление нейтронов может быть получено путем помещения источника в однородную водородосодержащую среду, например, в воду. Вместо водорода может быть использована и другая водородосодержащая среда, например, углеводород или легкие, не содержащие водород материалы (углерод, карбид бора и др.).

Для определения толщины защитного экрана от лабораторных источников нейтронов можно использовать номограммы, построенные по данным пространственно-энергетического распределения нейтронов в бесконечной водной среде от точечных моноэнергетических источников, рассчитанного методом моментов. Так, на рис. 5.1 и рис. 5.2 приведены номограммы для определения толщины  $d$  (см) водной защиты от нейтронов для (Po–Ве)- и (Po–В)-источников в зависимости от мощности излучения  $S$  (нейтрон/с) и расстояния от источника до облучаемого объекта  $R$  (см). Номограммы построены для продолжительности облучения 36 ч/нед. Номограммы этого типа для (Po–Ве)-источника с достаточной точностью можно использовать для (Pu–Ве)-источников.

На рис. 5.3 показана номограмма другого типа, связывающая толщину водной защиты  $d$  (см) для Po–В-, Ra–Ве-, Po–Ве- и Pu–Ве-источников нейтронов с кратностью ослабления  $K$ .

Номограмма, приведенная на рис. 5.4, связывает между собой поток нейтронов  $S$  (нейтрон/с), расстояние от источника до объекта облучения  $R$  (см) и время облучения в сутки  $t$  (ч). При любом сочетании этих параметров выполняются допустимые условия работы при профессиональном облучении без защиты.

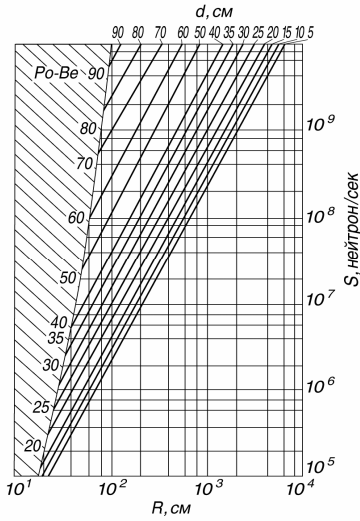


Рис. 5.1. Номограмма для определения толщины водной защиты от нейтронов для (Po-Be) источника

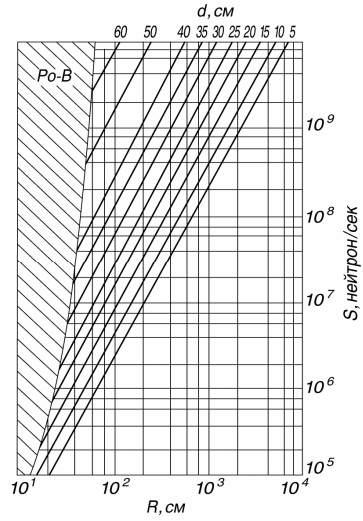


Рис. 5.2. Номограмма для определения толщины водной защиты от нейтронов для (Po-B)-источника

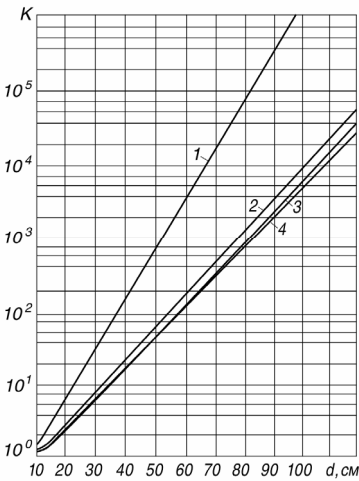


Рис. 5.3. Номограмма для определения толщины водной защиты от нейтронов по кратности ослабления водой для источников: 1 – Po-B; 2 – Ra-Be; 3 – Po-Be; 4 – Pu-Be

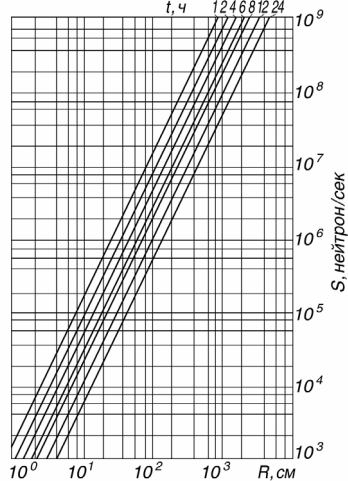


Рис. 5.4. Номограмма для расчета защиты от нейтронов без экранов

**Задача 5.5.** Определить толщину водной защиты от источника нейтронного излучения при заданных параметрах: мощности источника излучения  $S$  (нейтрон/с) и расстоянии от источника до облучаемого объекта  $R$  (м) (варианты 1...13) или кратности ослабления излучения  $K$  (варианты 14...25). Варианты заданий приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

**Варианты исходных данных к задаче 5.5**

Номер варианта	Источник к излучения	Мощность источника излучения $S$ , нейтрон/с	Расстояние от источника до облучаемого объекта $R$ , м	Кратность ослабления, $K$
1	(Po-Be)-источник	$1,3 \cdot 10^6$	1,0	–
2	(Pu-Be)-источник	$1,0 \cdot 10^7$	1,0	–
3	(Po-B)-источник	$1,8 \cdot 10^7$	2,0	–
4	(Po-Be)-источник	$1,0 \cdot 10^8$	8,0	–
5	(Pu-Be)-источник	$1,4 \cdot 10^8$	6,0	–
6	(Po-B)-источник	$1,1 \cdot 10^6$	0,6	–
7	(Po-Be)-источник	$1,3 \cdot 10^7$	3,0	–
8	(Pu-Be)-источник	$1,0 \cdot 10^6$	0,8	–
9	(Po-B)-источник	$1,4 \cdot 10^8$	3,0	–
10	(Po-Be)-источник	$1,6 \cdot 10^7$	1,5	–
11	(Pu-Be)-источник	$1,5 \cdot 10^7$	2,0	–
12	(Po-B)-источник	$1,5 \cdot 10^7$	1,0	–
13	(Po-Be)-источник	$1,6 \cdot 10^7$	4,0	–
14	(Po-Be)-источник	–	–	10
15	(Pu-Be)-источник	–	–	1000
16	(Po-B)-источник	–	–	500
17	(Ra-Be)-источник	–	–	700
18	(Po-Be)-источник	–	–	50
19	(Ra-Be)-источник	–	–	10
20	(Po-B)-источник	–	–	100
21	(Po-B)-источник	–	–	5
22	(Pu-Be)-источник	–	–	4
23	(Ra-Be)-источник	–	–	3
24	(Po-Be)-источник	–	–	8
25	(Po-B)-источник	–	–	5000

**Алгоритм определения толщины водной защиты от нейтронного излучения**

Для заданного источника нейтронного излучения определить толщину водной защиты по номограммам (рис. 5.1 и 5.2), если известны мощность источника излучения  $S$  (нейтрон/с) и расстояние от источника до облучаемого объекта  $R$  (см) (варианты 1...13) или по номограмме (рис. 5.3), если известна кратность ослабления излучения  $K$  (варианты 14...25).

**Задача 5.6.** Определить расстояние  $R_1$  (м) на котором может работать персонал без защитного экрана с источником нейтронного излучения мощностью  $S$  (нейтрон/с) в течение времени  $t_1$  (ч). Как изменится расстояние, если время работы поменяется согласно варианту заданий (табл. 5.9)?

Таблица 5.9

**Варианты исходных данных к задаче 5.6**

Номер варианта	Мощность источника излучения $S$ , нейтрон/с	Время работы с источником излучения в сутки $t_1$ , ч	Время работы с источником излучения в сутки $t_2$ , ч
1	$1,5 \cdot 10^6$	6	сократить на 2 ч
2	$1,1 \cdot 10^7$	2	увеличить в 2 раза
3	$1 \cdot 10^6$	6	сократить в 3 раза
4	$1,7 \cdot 10^6$	4	увеличить на 2 ч
5	$1 \cdot 10^7$	1	увеличить на 1 ч
6	$1 \cdot 10^7$	2	увеличить в 3 раза
7	$1,5 \cdot 10^6$	4	сократить в 2 раза
8	$1,1 \cdot 10^7$	1	увеличить на 3 ч
9	$1 \cdot 10^6$	6	сократить на 2 ч
10	$1 \cdot 10^6$	4	увеличить на 2 ч
11	$1,3 \cdot 10^6$	2	увеличить в 3 раза
12	$1 \cdot 10^7$	1	увеличить в 4 раза
13	$1 \cdot 10^7$	2	увеличить на 2 ч
14	$1,3 \cdot 10^6$	4	сократить в 4 раза
15	$1,5 \cdot 10^5$	6	сократить в 3 раза
16	$1 \cdot 10^6$	4	сократить в 4 раза
17	$1,8 \cdot 10^5$	1	увеличить на 1 ч
18	$1 \cdot 10^6$	2	увеличить в 3 раза
19	$1 \cdot 10^7$	4	сократить в 2 раза
20	$1,7 \cdot 10^6$	1	увеличить в 2 раза
21	$1,8 \cdot 10^5$	6	сократить в 3 раза
22	$1,1 \cdot 10^7$	2	увеличить в 2 раза
23	$1 \cdot 10^7$	6	сократить на 2 ч
24	$1 \cdot 10^6$	1	увеличить на 1 ч
25	$1 \cdot 10^7$	4	сократить в 4 раза

**Алгоритм расчета безопасных параметров работы с нейтронным излучением**

1. По номограмме (рис. 5.4) при заданных мощности источника излучения  $S$  (нейтрон/с) и времени  $t_1$  (ч) определить расстояние  $R_1$  (м), на котором может работать персонал без защитного экрана.
2. Определить расстояние  $R_2$  (м) при той же мощности источника излучения для времени  $t_2$  (ч).
3. Сравнить полученные расстояния и сделать вывод.



## Библиографический список

1. СанПиН 2.6.1.2523–09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)»: Гигиенические нормативы (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. №47).
2. СанПиН 2.6.1.1192–03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 14 февраля 2003 г.)
3. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 13 июня 2003 г. №118).
4. Защитные устройства. Справочное пособие под ред. проф. Б.М. Злобинского. – М.: Металлургия, 1971. – 456 с.
5. В.З. Козлов. Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 352 с.

**Взвешивающие коэффициенты  $W_R$  для отдельных видов  
излучения при расчете эквивалентной дозы [1]**

Вид излучения	$W_R$
Фотоны любых энергий	1
Электроны и мюоны любых энергий	1
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
от 10 до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
$\alpha$ -частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

**Взвешивающие коэффициенты  $W_T$  для тканей  
и органов при расчете эффективной дозы [1]**

Органы и ткани	$W_T$
Гонады	0,20
Костный мозг (красный)	0,12
Толстый кишечник	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальное	0,05*

\* «Остальное» включает надпочечники, головной мозг, экстраторакальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечную ткань, поджелудочную железу, селезенку, вилочковую железу и матку.

**Свинцовые эквиваленты  $d$  (мм) защиты  
в зависимости от кратности ослабления  $K$  рентгеновского излучения [2]**

K, отн. ед.	Свинцовый эквивалент $d$ (мм) при анодном напряжении $U_{max}$ (кВ)					
	50	75	100	150	200	250
	Толщина защиты из свинца, мм					
3	0,02	–	0,10	0,16	0,24	0,20
7	0,05	0,11	0,21	0,31	0,46	0,60
10	0,06	0,13	0,25	0,37	0,55	0,70
15	0,08	0,17	0,31	0,46	0,69	1,00
20	0,09	0,20	0,37	0,53	0,80	1,10
25	0,10	0,22	0,42	0,59	0,90	1,30
30	0,11	0,24	0,45	0,62	0,90	1,40
40	0,12	0,28	0,52	0,69	1,10	1,60
50	0,13	0,31	0,58	0,80	1,20	1,90
70	0,14	0,36	0,68	0,80	1,30	2,00
100	0,16	0,41	0,80	1,00	1,50	2,40
150	0,20	0,50	0,90	1,10	1,70	2,70
200	0,20	0,50	1,00	1,20	1,80	3,00
300	0,30	0,60	1,10	1,40	2,00	3,50
400	0,30	0,70	1,20	1,50	2,20	3,80
600	0,30	0,75	1,30	1,70	2,40	4,20
800	0,30	0,80	1,40	1,70	2,50	4,50
1000	0,30	0,80	1,50	1,80	2,60	4,70
1500	0,40	0,90	1,60	2,00	2,80	5,20
2000	0,40	1,00	1,70	2,10	3,00	5,60
2500	0,40	1,00	1,80	2,20	3,10	5,08
3000	0,40	1,10	1,90	2,30	3,20	6,00
4000	0,45	1,10	2,00	2,40	3,35	6,20
5000	0,50	1,15	2,10	2,50	3,50	6,60
6000	0,50	1,20	2,20	2,60	3,60	6,80
10000	0,50	1,30	2,30	2,75	3,90	7,40
12000	0,50	1,30	2,40	2,85	4,00	7,60
15000	0,55	1,35	2,50	2,95	4,10	7,80
20000	0,60	1,40	2,60	3,10	4,30	8,10
30000	0,60	1,50	2,70	3,20	4,50	8,60
40000	0,65	1,60	2,85	3,30	4,70	9,00
50000	0,65	1,65	2,90	3,40	4,80	9,20
60000	0,65	1,65	3,00	3,50	4,90	9,40
100000	0,70	1,80	3,20	3,70	5,20	10,00
200000	0,75	1,90	3,40	4,00	5,60	11,00
300000	0,80	2,00	3,60	4,20	5,80	11,40
500000	0,80	2,20	3,80	4,40	6,10	12,00
1000000	0,90	2,30	4,00	4,70	6,50	13,00
1500000	0,90	2,30	4,20	4,80	6,70	13,40
3000000	1,00	2,50	4,40	5,10	7,10	14,20
5000000	1,00	2,60	4,60	5,30	7,40	15,00
10000000	1,10	2,80	4,90	5,60	7,80	15,80

При определении свинцового эквивалента материалов для значений анодных напряжений, не указанных в таблице, можно использовать метод линейной интерполяции.

**Свинцовые эквиваленты строительных материалов,  
используемых для защиты от рентгеновского излучения [2]**

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Толщина свинцового эквивалента <i>d</i> , мм	Эквивалентная толщина материала <i>d</i> (мм) при напряжении на рентгеновской трубке $U_{max}$ (кВ)					
			50	75	100	150	200	250
Сталь	7,9	0,2	1,1	1,2	1,2	2,4	3,2	3,4
		0,5	3,2	3,2	3,2	6,6	7,6	8
		1	-	5,5	6	12	13	12
		2	-	11	12	25	27	20
		3	-	18	19	37	40	28
		4	-	24	25	50	55	35
		6	-	-	36	71	80	48
		8	-	-	50	93	108	60
Бетон	2,3	10	-	-	-	119	140	75
		1	-	80	85	85	85	60
		2	-	160	160	160	150	95
		3	-	210	210	230	210	125
		4	-	338	355	290	275	150
		6	-	-	-	450	400	210
		8	-	-	-	600	540	260
Кирпич полнотелый	1,8	10	-	-	-	-	670	300
		0,5	100	80	70	84	76	68
		1	200	150	120	150	130	120
		2	-	240	195	260	230	190
		3	-	320	260	340	310	250
		4	-	400	330	420	370	300
		6	-	-	450	570	490	390
		8	-	-	-	-	600	470
Пенобетон	0,63	10	-	-	-	-	-	540
		12	-	-	-	-	-	610
		0,2	84	-	66	82	92	77
		0,4	180	-	120	160	145	135
		0,6	280	-	170	230	200	180
		0,8	380	-	220	280	260	230
		1,0	480	-	270	340	310	270
		1,2	-	-	310	400	360	310
		1,4	-	-	350	450	410	340
		1,6	-	-	390	500	450	380
Строительный материал СРБ (тяжелый бетон)	2,7	1,8	-	-	430	560	500	410
		2,0	-	-	470	600	530	440
		1	20	21	24	28	-	-
		2	40	42	48	48	-	-
		3	60	62	70	70	-	-
		4	80	80	94	94	-	-
Строительный материал СРБ (тяжелый бетон)	2,7	6	-	-	-	132	-	-
		8	-	-	-	172	-	-

При определении свинцового эквивалента материалов для значений анодных напряжений, не указанных в таблице, можно использовать метод линейной интерполяции.

При отличии плотностей фактически применяемых материалов от материалов, близких по составу, указанных в таблице, толщину материала увеличивают или уменьшают пропорционально плотности применяемого материала.

**Толщина защиты из свинца  $d$  (см) в зависимости от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения ( $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$ )**

Кратность ослабления, $K$	Энергия $\gamma$ -излучения $h_\gamma$ , МэВ													
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	2,0	2,2
2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,15	1,3	1,5	1,7	2,0	2,0
5	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,5	1,9	2,2	2,5	2,8	3,4	3,8	4,3	4,4
10	0,3	0,55	0,9	1,3	1,6	2,1	2,6	3,05	3,5	3,8	4,5	5,1	5,9	6,1
20	0,3	0,6	1,1	1,5	2,0	2,6	3,25	3,85	4,4	4,9	5,8	6,6	7,6	7,8
30	0,35	0,7	1,15	1,7	2,3	3,0	3,65	4,3	4,95	5,5	6,5	7,3	8,5	8,8
50	0,4	0,85	1,4	1,95	2,6	3,25	3,95	4,6	5,3	6,0	7,2	8,2	9,6	10,0
100	0,5	1,0	1,6	2,3	3,0	3,85	4,7	5,5	6,3	7,0	8,45	9,65	11,3	11,7
200	0,6	1,25	1,9	2,6	3,4	4,4	5,3	6,3	7,2	8,0	9,65	11,1	12,9	13,4
500	0,65	1,4	2,2	3,1	4,0	5,1	6,1	7,2	8,2	9,2	11,3	12,9	15,0	15,4
1000	0,7	1,5	2,4	3,3	4,4	5,7	6,95	8,1	9,2	10,2	12,3	14,1	16,5	17,0
2000	0,85	1,7	2,7	3,8	5,0	6,3	7,6	8,8	10,0	11,1	13,5	15,4	17,9	18,5
5000	0,9	1,9	3,0	4,2	5,5	7,0	8,5	9,9	11,2	12,4	14,9	17,0	19,8	20,5
10000	1,05	2,1	3,3	4,55	5,9	7,5	9,1	10,6	12,0	13,3	16,1	18,3	21,3	22,1
20000	1,1	2,2	3,5	4,85	6,3	8,0	9,7	11,3	12,8	14,2	17,2	19,5	22,7	23,5
50000	1,15	2,35	3,7	5,2	6,9	8,7	10,5	12,3	14,0	15,6	18,8	21,4	24,7	25,5

**Толщина защиты из железа  $d$  (см) в зависимости от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения ( $\rho = 7,89 \text{ г/см}^3$ )**

Кратность ослабления, $K$	Энергия $\gamma$ -излучения $h_\gamma$ , МэВ													
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	2,0	2,2
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,45	3,6	3,9	4,1
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,8	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	6,9	7,4	8,1	8,3
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	9,3	10,0	11,0	11,4
20	2,3	4,3	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	9,4	9,8	10,3	11,3	12,2	13,6	14,1
30	2,4	4,5	6,2	7,5	8,5	9,2	9,8	10,4	10,9	11,4	12,6	13,6	15,1	15,6
50	2,9	5,2	7,1	8,4	9,5	10,3	11,0	11,6	12,2	12,7	13,9	15,1	16,9	17,5
100	3,4	6,1	8,1	9,6	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5	16,1	17,3	19,5	20,2
200	4,2	7,0	9,1	10,7	12,0	13,1	14,0	14,8	15,6	16,3	18,0	19,6	22,0	22,8
500	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	20,6	22,3	25,0	25,9
1000	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,5	18,0	19,6	20,5	22,6	24,4	27,5	28,6
2000	4,9	9,0	11,1	14,4	16,2	17,7	19,0	20,2	21,2	22,2	24,5	26,5	30,0	31,2
5000	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	27,0	29,4	33,3	34,3
10000	6,8	11,5	14,7	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	28,8	31,3	35,5	36,9
20000	8,0	12,9	16,0	18,3	20,2	21,9	23,4	24,8	26,3	27,6	30,6	33,2	37,8	39,2
50000	8,6	13,8	17,0	19,6	21,8	23,6	25,2	26,9	28,4	29,9	33,0	35,9	40,8	42,3

**Толщина защиты из бетона  $d$  (см) в зависимости  
от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения ( $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$ )**

Кратность ослабления, $K$	Энергия $\gamma$ -излучения $h_\gamma$ , МэВ													
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	2,0	2,2
2	4,7	7,6	9,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7	12,9	13,3	13,6	14,1	14,3
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5	24,6	25,8	28,2	29,4
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	31,9	34,0	37,6	39,0
20	8,2	15,3	21,4	25,8	29,9	31,9	33,6	35,0	36,2	37,0	39,9	42,5	47,0	48,6
30	8,5	16,4	22,8	27,7	32,9	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5	43,7	46,5	51,6	53,5
50	9,9	18,8	25,1	30,8	35,0	37,6	39,4	41,2	42,8	44,6	48,5	52,1	58,1	60,1
100	11,5	21,1	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	54,5	58,3	65,7	68,6
200	12,7	23,5	32,4	39,2	44,6	47,9	50,5	52,6	54,6	56,4	60,8	65,3	74,0	77,2
500	13,8	24,6	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6	69,8	74,8	84,5	88,5
1000	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,8	70,4	76,1	81,7	92,7	97,0
2000	17,6	30,5	42,3	52,4	59,9	64,1	67,4	70,4	73,2	75,7	82,2	88,5	100,4	104,0
5000	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	90,2	97,4	110,9	115,5
10000	18,8	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82,9	86,2	89,2	97,2	104,5	118,6	124,7
20000	21,1	38,4	51,9	63,4	72,8	78,2	83,1	87,3	91,1	94,5	102,7	110,8	126,2	131,7
50000	23,3	42,3	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93,4	97,9	102,1	111,5	120,4	136,2	142,0

## 6. РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ВИБРАЦИИ

### 6.1. Основные понятия и определения

*Вибрация*, возникающая при работе машин, механизмов и их элементов, носит характер сложного (иногда импульсного) колебания. Сложный периодический колебательный процесс можно представить в виде суммы гармонических функций:

$$x(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot \cos\left(2\pi i \frac{t}{T} - \varphi_i\right), \quad (6.1)$$

где  $A_i$ ,  $\varphi_i$  – амплитуда и фаза  $i$ -й гармоники;

$t$  – время;

$T$  – период колебаний.

*Вибросмещение* на основной (несущей) частоте:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (6.2)$$

где  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  – угловая частота колебаний.

*Виброскорость* и *виброускорение* – соответствуют первой и второй производным по времени вибросмещения. Амплитудные значения виброскорости к виброускорения соответственно равны:

$$V_m = 2\pi f_0 A; \quad a_m = 4\pi^2 f_0^2 A \quad (6.3)$$

Для оценки воздействия вибраций на организм человека проводят спектральный анализ, рассматривая зависимости средних квадратических значений амплитуд виброскоростей и виброускорений от частоты. Для удобства построения спектрограмм вибрации весь интересующий интервал делят на октавные или третьоктавные полосы частот. *Октавная полоса частот (октава)*, это полоса частот, верхняя  $f_B$  и нижняя  $f_H$  частоты которой связаны соотношением  $f_B = 2 \cdot f_H$ .

*Третьоктавная полоса частот (третьоктава)* – такая полоса частот, верхняя и нижняя частоты которой связаны соотношением  $f_B = \sqrt[3]{2} \cdot f_H$ . Средняя частота, полосы определяется как среднегеометрическая из значений граничных частот. Ввиду широких пределов изменения параметров вибраций используют логарифмические уровни (в дБ) виброскорости  $L_V$  и виброускорения  $L_a$ :

$$L_V = 20 \lg(V/V_0); \quad L_a = 20 \lg(a/a_0), \quad (6.4)$$

где  $V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с и  $a_0 = 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> – опорные значения виброскорости и виброускорения.

Гигиеническую оценку вибрации, действующей на человека в производственных условиях, необходимо производить согласно ГОСТ 12.1.012–90 [1] и СН 2.2.4/2.1.8.566–96 [2].

По способу передачи на человека вибрация подразделяется на:

а) *общую*, передающуюся через опорные поверхности сидящего или стоящего человека;

б) *локальную*, передающуюся через руки человека.

Для санитарного нормирования и контроля используются средние квадратичные значения виброскорости  $V$  или виброускорения  $a$  и их логарифмические уровни – для локальной вибрации в октавных полосах частот, а для общей вибрации в октавных или третьоктавных полосах частот.

*Общую вибрацию* в зависимости от условий труда подразделяют на три категории: 1 – транспортная, 2 – транспортно-технологическая, 3 – технологическая (ГОСТ 12.1.012–90). В табл. 6.1 приведены предельно допустимые параметры вибрации рабочих мест категории 3 – технологической типа «а», действующей на операторов стационарных машин и оборудования или передающейся на рабочие места, не имеющие источников вибрации.

Таблица 6.1

Допустимые значения вибрации рабочих мест категории 3а

Среднегеометрическая частота, Гц	Виброускорение				Виброскорость			
	м/с <sup>2</sup>		дБ		м/с · 10 <sup>-2</sup>		дБ	
	Третьоктава	Октава	Третьоктава	Октава	Третьоктава	Октава	Третьоктава	Октава
1,6	0,090	0,14	99	103	0,90	1,30	105	108
2,0	0,080		98		0,64		102	
2,5	0,071		97		0,46		99	
3,15	0,063	0,10	96	100	0,32	0,45	96	99
4,0	0,056		95		0,23		93	
5,0	0,056		95		0,18		91	
6,3	0,056	0,11	95	101	0,14	0,22	89	93
8,0	0,056		95		0,12		87	
10,0	0,071		97		0,12		87	
12,5	0,090	0,20	99	106	0,12	0,20	87	92
16,0	0,112		101		0,12		87	
20,0	0,140		103		0,12		87	
25,0	0,180	0,40	105	112	0,12	0,20	87	92
31,5	0,220		107		0,12		87	
40,0	0,285		109		0,12		87	
50,0	0,355	0,80	111	118	0,12	0,20	87	92
63,0	0,455		113		0,12		87	
80,0	0,560		115		0,12		87	



В помещениях для работников умственного труда предельно допустимые значения вибрации на рабочих местах категории 3 типа «в» приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

**Допустимые значения вибрации рабочих мест категории 3в**

Среднегеометрическая частота, Гц	Виброускорение				Виброскорость			
	м/с <sup>2</sup>		дБ		м/с · 10 <sup>-2</sup>		дБ	
	Третьоктава	Октава	Третьоктава	Октава	Третьоктава	Октава	Третьоктава	Октава
1,6	0,0130	0,0	82	86	0,130	1,1	88	91
2,0	0,0110		81		0,089		85	
2,5	0,0100		20		80		0,063	
3,15	0,0089	0,0	79	83	0,045	0,0	79	82
4,0	0,0079		78		0,032		76	
5,0	0,0079		140		78		0,025	
6,3	0,0079	0,0	78	83	0,020	0,0	72	76
8,0	0,0079		78		0,016		70	
10,0	0,0100		14		80		0,016	
12,5	0,0130	0,0	82	89	0,016	0,0	70	75
16,0	0,0160		84		0,016		70	
20,0	0,0200		28		86		0,016	
25,0	0,0250	0,0	88	95	0,016	0,0	70	75
31,5	0,0320		90		0,016		70	
40,0	0,0400		56		92		0,016	
50,0	0,0500	0,1	94	101	0,016	0,0	70	75
63,0	0,0630		96		0,016		70	
80,0	0,0790		10		98		0,016	

Вибрация, удовлетворяющая гигиеническим нормам, ни в одной из октавных (или третьоктавных) полос не должна превышать приведенные значения.

Вредное воздействие вибрации на человека зависит от времени действия. Нормы вибрации установлены для производственных помещений при длительности воздействия на человека 8 ч. При времени фактического воздействия 10 мин  $t < 8$  ч значения нормируемых параметров вибрации  $u_t$  (виброускорения или виброскорости), или их уровней  $L_u$ , приведенные в табл. 6.1 и 6.2, определяются по формулам:

$$u_t = u_8 \sqrt{8/t}, \quad (6.5)$$

$$L_t = L_8 + 10 \lg(8/t), \quad (6.6)$$

где  $t$  – время фактического воздействия вибрации за смену, ч.

Для снижения воздействия вибрации оборудования до нормируемых значений применяют следующие методы виброзащиты: виброизоляция, динамическое гашение колебаний, демпфирование и др. Одной из наиболее эффективных мер является виброизоляция. Этот метод реализуется путем введения дополнительной упругой связи между источником вибрации и защищаемым объектом.

Степень реализации виброзащиты можно охарактеризовать коэффициентом динамичности  $\alpha$ . Зависимость  $\alpha$  от частотного отношения  $\eta$  имеет вид:

$$\alpha = |1 - \eta^2|^{-1}, \quad (6.7)$$

где  $\eta = \omega_1 / \omega_0$ ;  $\omega_1, \omega_0$  – угловые частоты колебаний соответственно вынуждающей силы и собственных колебаний агрегата.

Графически зависимость (6.7) представлена на рис. 6.1:

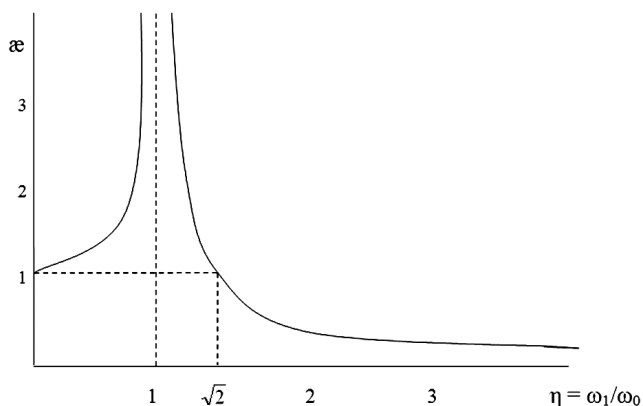


Рис. 6.1. Зависимость коэффициента динамичности от частотного отношения

Из графика рис. 6.1 следует:

- 1) если  $\omega_1 < \omega_0$ , то  $\alpha \rightarrow 1$ , т.е. вынуждающая сила действует как статическая, полностью передаваясь основанию;
- 2) при  $\omega_1 = \omega_0$  имеет место резонанс, который может стать причиной аварийной или предаварийной ситуации;
- 3) при  $\omega_1 \geq \sqrt{2} \cdot \omega_0$ ;  $\alpha \leq 1$  и эффективность виброизолятора возрастает с увеличением  $\eta$ . Поэтому условием хорошей работы

виброизоляторов является  $\omega_1 / \omega_0 > \sqrt{2}$ . Опытным путем установлено, что при  $\eta = 2,5 \dots 5$  эффективность виброизоляторов составляет 81...96 %.

Приблизительно *эффективность виброизоляторов*  $U$  (%) определяют через коэффициент динамичности  $\alpha$  по формуле:

$$U = 100 \cdot (1 - \alpha), \quad (6.8)$$

*ослабление уровня вибрации*  $\Delta L$  (дБ) выражают через коэффициент динамичности  $\alpha$  формулой:

$$\Delta L = 20 \cdot \lg \frac{1}{\alpha}. \quad (6.9)$$

Серийно выпускаемые виброизоляторы классифицируются по виду материала упругого элемента или способу введения демпфирования. Различают *резинометаллические, пружинные и цельнометаллические* виброизоляторы с сухим трением.

Упругим элементом *резинометаллических виброизоляторов* является фасонный резиновый массив, соединенный с деталями металлической арматуры с помощью вулканизации. Достоинства виброизоляторов этого типа заключается в простоте их конструкции, в широком диапазоне изменения их упругих характеристик, определяющихся как маркой применяемой резины, так и конфигурацией упругого элемента. Свойства резины определяют ограничения на применение этих виброизоляторов при неблагоприятных условиях эксплуатации: повышенная или пониженная температура и влажность, наличие масел, паров бензина, кислот, щелочей.

Упругий элемент пружинных виброизоляторов представляет фасонную пружину – коническую или экспоненциальную. По сравнению с резинометаллическими виброизоляторами пружинные обладают большим ресурсом работы, их упругие характеристики гораздо меньше зависят от внешних условий, могут работать в агрессивных средах. Демпфирование в виброизоляторах этого типа создается искусственно. Кроме того они рекомендуются для виброизоляции оборудования, имеющего скорость вращения  $n < 1800$  об/мин.

## 8.2. Расчет резинометаллических виброизоляторов

Область применения резинометаллических виброизоляторов – виброизоляция оборудования, имеющего скорость вращения  $n > 1800$  об/мин при отсутствии агрессивных сред. Расчет сводится к определению параметров комплекта резинометаллических виброизоляторов технологического оборудования.

### Методика расчета резинометаллических виброизоляторов

1. Определяют частоту колебаний вынуждающей силы  $f_1$  (Гц) источника вибраций по известному значению скорости вращения  $n$ :  $f_1 = n / 60$  и частоту собственных колебаний  $f_0$  (Гц) по заданному или вычисленному значению частного отношения  $\eta$ :  $f_0 = f_1 / \eta$ .

2. Статическая осадка виброизолятора  $x_{ст}$  (м) под действием нагрузки массой  $m$  (кг) определяется по формуле:

$$x_{ст} = \frac{g}{\omega_0^2}, \quad (6.10)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $\text{с}^{-1}$ .

3. Для выбранного материала упругого элемента виброизолятора определяют отношение динамического модуля упругости материала,  $E$  ( $\text{Н/м}^2$ ) к допустимой нагрузке на сжатие материала  $\sigma$  ( $\text{Н/м}^2$ ) (например, из табл. 6.3) и рассчитывают его толщину  $h$  (м):

$$h = x_{ст} \frac{E}{\sigma}. \quad (6.11)$$

Таблица 6.3

Упругие свойства виброизолирующих материалов

Материал	$E, \text{Н/м}^2 \cdot 10^5$	$\sigma, \text{Н/м}^2 \cdot 10^5$	$E / \sigma$
Резина марки 112А	43	1,72	25
Резиновые ребристые плиты	49	0,98	50
Резина средней мягкости	200...250	3...4	64
Резина мягкая	50	0,80	63
Войлок мягкий	20	0,25	80
Резина губчатая	30	0,30	100

4. Общую площадь системы виброизоляторов определяют по формуле:

$$S = \frac{m \cdot g}{\sigma}. \quad (6.12)$$

5. Исходя из площади и конфигурации оборудования – источника вибраций, определяют минимально необходимое число виброизоляторов  $N$ . Тогда площадь одного виброизолятора составит  $S_1 = S / N$ .

6. Толщина упругого элемента  $h$  должна удовлетворять двум условиям:

а) отсутствие условия возникновения резонансных явлений в упругом элементе:

$$h < 0,5 \cdot \lambda, \quad (6.13a)$$

где  $\lambda = \tilde{c} / f_1$  – длина волны колебаний в материале упругого элемента, м,  
 $\tilde{c}$  – скорость распространения колебаний в упругом элементе;  
 для материалов, представленных в табл. 6.3, изменяется в пределах от 40 до 60 м/с.

б) отсутствие сдвига в горизонтальной плоскости в материале упругого элемента:

$$h < a / 4, \quad (6.13б)$$

где  $a$  – меньшая сторона (диаметр) одного виброизолятора, м.

Если параметры упругого элемента виброизоляторов с выбранным материалом оказываются неприемлемыми, то выбирается другой материал, либо изменяется число виброизоляторов.

**Задача 6.1.** Производственное оборудование массой  $m$  и скоростью вращения  $n$  создает вибрацию, заданную одним из параметров  $a$ ,  $V$  или  $L_V$  в третьоктавном спектре, как в производственном помещении, так и в помещении управления (табл. 6.4). Рассчитать систему виброизоляторов под оборудование, снижающую вибрацию в соответствующем помещении до нормативных значений.

Таблица 6.4

Варианты исходных данных к задаче 6.1

№ вар.	$m$ , кг	$n$ , об/мин	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$V$ , м/с·10 <sup>-2</sup>	$L_V$ , дБ	Тип помещения*	$t$ , ч
1	2	3	4	5	6	7	8
1	140	3360	–	–	108,0	П	8
2	180	2160	–	0,080	–	У	8
3	160	3600	2,40	–	–	П	6,5
4	170	2352	–	–	84	У	8
5	120	2130	–	0,70	–	П	6,5
6	110	2448	0,190	–	–	У	8
7	200	2400	–	–	103,0	П	5,0
8	120	2646	–	0,084	–	У	8
9	300	2862	2,47	–	–	П	6,0
10	160	2226	–	–	85,6	У	8
11	40	4320	–	6,89	–	П	5,5
12	180	2400	0,210	–	–	У	8
13	120	2520	–	–	104,6	П	6,5
14	140	2268	–	0,150	–	У	8
15	100	2940	9,11	–	–	П	1,5
16	200	2100	–	–	91,0	У	8

№ вар.	$m$ , кг	$n$ , об/мин	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$V$ , м/с·10 <sup>-2</sup>	$L_V$ , дБ	Тип помещения*	$t$ , ч
17	160	2646	–	1,62	–	П	3,5
18	100	2703	0,300	–	–	У	8
19	190	1890	–	–	89,0	У	8
20	80	4200	–	3,08	–	П	1,5
21	200	2700	7,30	–	–	П	7,0
22	160	2310	–	–	92,8	У	8
23	50	3240	–	2,92	–	П	5,0
24	100	2520	–	0,1344	–	У	8
25	110	3024	–	–	106,0	П	8,0

\*) Тип помещения: П – производственное помещение; У – помещение управления.

### ***Алгоритм расчета резинометаллических виброизоляторов***

1. Уточнить допустимое значение вибраций на рабочих местах с учетом фактического времени воздействия вибрации за смену  $t$ : в производственных помещениях, используя табл. 6.1, в помещениях управления, используя табл. 6.2. Если заданы значения виброускорения или виброскорости – использовать для этого формулу (6.5), если уровень виброскорости – формулу (6.6).

2. Определить величину  $1/\alpha$ . Для этого:

– если заданы значения виброускорения или виброскорости, то определить эффективность  $U$  (%), как превышение заданного в исходных данных значения вибраций над допустимыми значениями и использовать формулу (6.8);

– если задано значение уровня виброскорости, то определить превышение  $\Delta L$  над допустимым значением и использовать формулу (6.9).

3. Определить значение частного отношения  $\eta$ , используя формулу (6.7).

4. Следуя п.1 методики, определить значение частоты колебаний вынуждающей силы  $f_1$  по заданному значению скорости вращения  $n$  и значение частоты собственных колебаний  $f_0$ .

5. Определить статическую осадку виброизолятора  $x_{ст}$  по формуле (6.10). Из табл. 6.3 выбрать материал для виброизоляторов и рассчитать их толщину  $h$  по формуле (6.11).

6. Рассчитать общую площадь системы виброизоляторов по формуле (6.12) и, определившись с их числом  $N$ , вычислить площадь каждого  $S_1$ .

7. Проверить условия (6.13). Если они не выполняются – повторить расчет с другим материалом или числом виброизоляторов.

Сделать выводы по расчету виброизоляторов.

### 6.3. Расчет пружинных виброизоляторов

Цель расчета – определить следующие параметры пружинных виброизоляторов: материал и количество виброизоляторов, диаметр и число витков каждого из них для снижения вибраций на рабочих местах до нормативных значений.

#### *Методика расчета пружинных виброизоляторов*

1. Определяют частоту колебаний вынуждающей силы  $f_1$  (Гц) источника вибраций по известному значению скорости вращения  $n$ :  $f_1 = n / 60$  и частоту собственных колебаний  $f_0$  (Гц) по заданному или вычисленному значению частного отношения  $\eta$ :  $f_0 = f_1 / \eta$ .

2. Необходимую общую жесткость комплекта виброизоляторов в вертикальном направлении  $c_0$  (Н/м) определяют в соответствии с известным соотношением  $\omega_0 = \sqrt{c/m}$  по формуле:

$$c_0 = m\omega_0^2, \quad (6.14)$$

а жесткость одного из  $N$  виброизоляторов, расположенных симметрично относительно вертикальной оси, проведенной через центр масс:  $c_1 = c_0 / N$ .

3. Амплитуду вертикальных колебаний объекта  $x_0$  (м) для гармонической возмущающей силы рассчитывают по формуле:

$$x_0 = \frac{m \cdot g}{m \cdot \omega_1^2 - c_0}, \quad (6.15)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1 = \pi n / 30$ ,  $c^{-1}$ .

4. Максимальную рабочую нагрузку на одну пружину  $P_1$  (Н) определяют по формуле:

$$P_1 = P_{ст1} + k_1 P_{дин1}, \quad (6.16)$$

где  $P_{ст1} = mg / N$  – статическая нагрузка на одну пружину, Н;

$P_{дин1} = x_0 c_1$  – динамическая нагрузка на одну пружину в рабочем режиме изолируемого объекта, Н;

$k_1 = 1,5$  – коэффициент, учитывающий усталость материала пружины.

5. Диаметр проволоки пружины  $d$  (м) может изменяться в широких пределах (3...40 мм) его определяют по формуле:

$$d \geq 1,6 \cdot \sqrt{P_1 \cdot v \cdot k / \tau_d}; \quad (6.17)$$

В формуле (6.17):  $v = D / d$  – индекс пружины, значение  $v$  рекомендуется принимать от 4 до 10, в зависимости от максимальной рабочей нагрузки на пружину  $P_1$ :

при	$P_1 \leq 440 \text{ Н}$	$v = 10;$	
при	$440 < P_1 \leq 1290 \text{ Н}$	$v = 9;$	(6.18)
при	$P_1 > 1290 \text{ Н}$	$v = 8.$	

где  $D$  – средний диаметр пружины, м;

$k$  – коэффициент сжимаемости пружины, определяется по графику рис. 6.2 в зависимости от индекса пружины  $v$ ;

$\tau_d$  – допустимое напряжение сдвига при кручении материала пружины, значения  $\tau_d$  (Н/м<sup>2</sup>) для марок сталей, рекомендуемых для изготовления пружин, приведены в табл. 6.5.

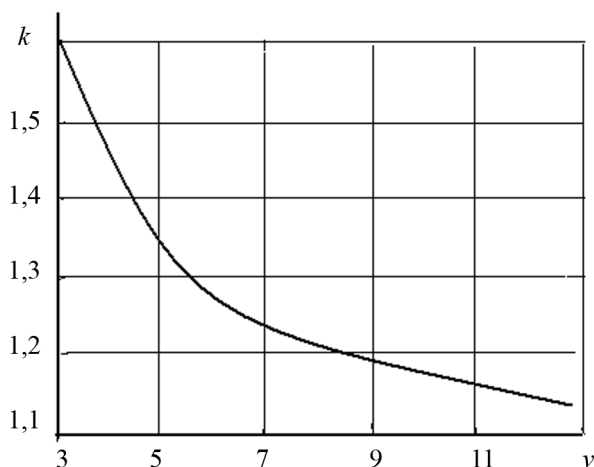


Рис. 6.2. Определение коэффициента  $k$

б. Полное число витков пружины  $i = i_p + i_m$ ,

где  $i_p$  – число рабочих витков,



$$i_p = \frac{d \cdot G}{8 \cdot v^3 \cdot c_1} \quad (6.19)$$

где  $G$  – модуль сдвига материала пружины, Н/м<sup>2</sup> (табл. 6.5);

$i_m$  – число мертвых витков, принимаемое:

$$i_m = 1,5 \text{ при } i_p < 7; \quad i_m = 2,5 \text{ при } i_p \geq 7. \quad (6.20)$$

Таблица 6.5

### Параметры пружинных сталей

Марка	$G, \text{Н/м}^2 \cdot 10^{10}$	Режим работы*	$\tau_d, \text{Н/м}^2 \cdot 10^8$	Назначение	
				$P_1, \text{Н}$ при $d, \text{мм}$	
70	7,83	легкий средний тяжелый	4,11 3,73 2,74	менее 940	не более 8
55С2 60С2 63С2А	7,45	легкий средний тяжелый	5,49 4,41 3,43	более 1200	более 9
50ХФА	7,70	легкий средний тяжелый	5,49 4,90 3,92	более 2400	более 12,5

*Примечание:* Режим работы пружинных виброизоляторов:

– легкий: 1) пассивная виброизоляция объектов (при кинематическом возбуждении) чувствительных к вибрациям;

2) активная виброизоляция (при силовом возбуждении) машин:

а) I категория динамичности (КД) (по табл. 6.6),  $n > 400$  об/мин;

б) II КД,  $n > 2000$  об/мин;

– средний: активная виброизоляция машин:

а) II КД,  $400 < n < 2000$  об/мин;

б) III КД,  $n > 2000$  об/мин;

– тяжелый: активная виброизоляция машин:

а) III КД,  $400 < n < 2000$  об/мин;

б) IV КД.

Таблица 6.6

### Зависимость категории динамичности от рабочей нагрузки

Категория динамичности (КД)	I	II	III	IV
Рабочая нагрузка $P_1, \text{Н}$	до 98	98–980	980–9800	более 9800

**Задача 6.2.** Рассчитать систему виброизоляторов под агрегат металлургического производства массой  $m$ , имеющий силовое возбуждение со скоростью вращения  $n$ . Необходимо при устройстве виброизоляции снизить до нормативных значений вибрацию, заданную в третьоктавном спектре, как в производственном помещении, так и в помещении управления, если время фактического воздействия вибрации на рабочем месте  $t$ . Варианты заданий приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Варианты исходных данных к задаче 6.2

№ вар.	$m$ , кг	$n$ , об/мин	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$V$ , м/с·10 <sup>-2</sup>	$L_v$ , дБ	Тип помещения*	$t$ , ч
1	2	3	4	5	6	7	8
1	110	924	–	–	92,8	У	8,0
2	500	1176	–	0,80	–	П	4,5
3	150	1470	0,126	–	–	У	8,0
4	2000	420	–	–	110,0	П	8,0
5	130	1323	–	0,150	–	У	8,0
6	1000	720	1,90	–	–	П	4,0
7	80	1050	–	–	91,0	У	8,0
8	2000	360	–	1,12	–	П	8,0
9	130	1272	0,118	–	–	У	8,0
10	500	780	–	–	99,6	П	4,0
11	170	1008	–	0,080	–	У	8,0
12	3000	580	0,45	–	–	П	5,0
13	160	1542	–	–	89,0	У	8,0
14**	200	2160	–	1,79	–	П	8,0
15	120	1440	0,120	–	–	У	8,0
16**	300	2772	–	–	112,3	П	4,5
17	180	1029	–	0,084	–	У	8
18	200	1500	1,00	–	–	П	7,0
19	3000	300	–	–	94,5	П	8,0
20	120	900	–	0,1344	–	У	8,0
21	200	1134	0,125	–	–	У	8,0
22**	150	2190	–	–	114,8	П	2,0
23	90	1470	0,280	–	–	У	8,0
24	700	756	1,00	–	–	П	5,0
25	110	1176	–	–	84,0	У	8,0

\*) Тип помещения: П – производственное помещение; У – помещение управления

\*\*) Агрегат работает при наличии агрессивных сред или повышенных температур.

### **Алгоритм расчета пружинных виброизоляторов**

1. Уточнить допустимое значение вибраций на рабочих местах с учетом фактического времени воздействия вибрации за смену  $t$ : в производственных помещениях, используя табл. 6.1; в помещениях управления, используя табл. 6.2. Если заданы значения виброускорения или виброскорости – использовать для этого формулу (6.5), если уровень виброскорости – формулу (6.6).

2. Определить величину  $1/\alpha$ . Для этого:

– если заданы значения виброускорения или виброскорости, то определить эффективность  $U$  (%) как превышение заданного в исходных данных значения вибраций над допустимыми значениями и использовать формулу (6.8);

– если задано значение уровня виброскорости, то определить превышение  $\Delta L$  над допустимым значением и использовать формулу (6.9).

3. Определить значение частного отношения  $\eta$ , используя формулу (6.7).

4. Следуя п.1 методики, определить значение частоты колебаний вынуждающей силы  $f_1$  по заданному значению скорости вращения  $n$  и значение частоты собственных колебаний  $f_0$ .

5. Определить необходимую общую жесткость системы виброизоляторов  $c_0$  из формулы (6.14). Определившись с числом пружин  $N$ , рассчитать жесткость одной пружины  $c_1$ .

6. Рассчитать амплитуду вертикальных колебаний  $x_0$  согласно формуле (6.15) и максимальную рабочую нагрузку на одну пружину  $P_1$  по формуле (6.16).

7. Определить по соотношениям (6.18) индекс пружины  $v$ , по графику рис. 6.2 – коэффициент сжимаемости  $k$ .

8. Определив по табл. 6.6 категорию динамичности, по примечанию к табл. 6.5 – режим работы виброизоляторов, по табл. 6.5 выбираем марку стали пружин с соответствующим допустимым напряжением сдвига  $\tau_d$ .

9. Рассчитать по формуле (6.17) диаметр проволоки пружины  $d$ ; уточнить его значение и определить средний диаметр пружины  $D = v \cdot d$ .

10. Определить число рабочих витков пружины  $i_p$  по формуле (6.19); в соответствии с условием (6.20) – число мертвых витков пружины  $i_m$  и полное число витков  $i$ .

Сделать выводы по расчету виброизоляторов.

## **Библиографический список**

1. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2006.
2. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997.

## 7. РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА

### 7.1. Основные понятия и определения

**Шум** – это беспорядочное сочетание звуков различной частоты и интенсивности, возникающих при упругих колебаниях в твердых, жидких и газообразных средах.

При звуковых колебаниях частиц среды в ней возникает переменное давление, называемое **звуковым давлением**  $P$  (Па). Распространение звуковых волн сопровождается переносом энергии, величина которой определяется **интенсивностью звука**  $I$  (Вт/м<sup>2</sup>). Для оценки шума удобно измерять не абсолютные значения интенсивности и звукового давления, а относительные их уровни в логарифмических единицах, взятые по отношению к пороговым значениям.

За единицу измерения уровней звукового давления и интенсивности звука принят децибел – дБ. **Уровень звукового давления** определяется по формуле:  $L_p = 20 \lg(P/P_0)$ , где  $P_0$  – пороговое звуковое давление, равное  $2 \cdot 10^{-5}$  Па, а **уровень интенсивности звука** по формуле:  $L_I = 10 \lg(I/I_0)$ , где  $I_0$  – пороговое значение интенсивности звука, равное  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Для частотной характеристики шума звуковой диапазон разбивают на **октавные полосы частот**, где верхняя граничная частота  $f_v$  равна удвоенной нижней частоте  $f_n$ , т.е.  $f_v/f_n=2$ . **Октавная полоса** характеризуется среднегеометрической частотой  $f_{cp} = \sqrt{f_n \cdot f_v}$ .

**Уровень звука** – это измеренное значение шума с учетом коррекции, приближенно отражающей чувствительность человеческого уха (по шкале  $A$  шумомера), измеряемое в дБА.

СН 2.2.4/2.1.8.562.96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» [1] устанавливает предельно допустимые уровни постоянного шума, который при действии на работающего в течение 8-часового рабочего дня не приносит вреда здоровью (табл. 7.1).

Снижение уровня шума, распространяющегося по воздуху, наиболее радикально может быть осуществлено устройством на пути его распространения звукоизолирующих преград. Принцип звукоизоляции заключается в том, что большая часть падающей на преграду звуковой энергии отражается и лишь незначительная ее часть проникает через преграду. **Звукоизоляцией** называется ослабление звуковой энергии при передаче ее через преграду.

Таблица 7.1

**Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни для основных видов трудовой деятельности**

Вид трудовой деятельности	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, программирование, преподавание и обучение	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Высококвалифицированная работа, рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в лабораториях	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60
Рабочие места в помещениях диспетчерской службы, кабинетах и помещениях наблюдения и дистанционного управления с речевой связью по телефону, в помещениях мастеров, в залах обработки информации на вычислительных машинах	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65
Рабочие места за пультами в кабинах наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону, в помещениях лабораторий с шумным оборудованием	103	91	83	77	70	68	66	66	64	75
Выполнение всех видов работ (за исключением перечисленных в п.п. 1 – 4) на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

*Звукоизолирующая способность* материала и конструкции оценивается в дБ и определяется по формуле:

$$R = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_{\text{пад}}}{P_{\text{пр}}} \right), \quad (7.1)$$

где  $P_{\text{пад}}$  – звуковое давление, падающее на преграду, Па;  
 $P_{\text{пр}}$  – звуковое давление, прошедшее через преграду, Па.

Характер и значение звукоизоляции ограждения в значительной степени зависит от частоты падающего звука, и рассматриваются для трех частотных диапазонов.

В первом частотном диапазоне на низких частотах ( $f < 100$  Гц) вблизи частот собственных колебаний ограждения звукоизолирующие качества ограждения определяются его жесткостью и внутренним трением материала.

Во втором частотном диапазоне ( $100 < f < 3500$  Гц) звукоизолирующая способность зависит от массы ограждения и частоты падающего звука, рассчитывается по формуле:

$$R = 20 \cdot \lg (\rho \cdot h \cdot f) - 47,5; \quad (7.2)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – толщина ограждения, м;

$f$  – частота, Гц.

В третьем частотном диапазоне ( $f > 3500$  Гц) звукоизоляция однослойного ограждения значительно снижается из-за эффекта волнового совпадения, наступающего при равенстве длин волны падающего звука и изгибных колебаний ограждения. Область пониженной звукоизоляции занимает интервал примерно в одну октаву, снижение звукоизоляции ограждения на этих частотах – на 10...20 дБ.

Звукоизоляция двухслойных ограждений с воздушным промежутком между стенками эффективнее однослойной преграды равной массы. Звукоизоляция двойных ограждений помимо факторов, определяющих ее для однослойных ограждений, также зависит от толщины воздушного промежутка и соотношения поверхностной плотности каждого из ограждений.

## 7.2. Расчет звукоизолирующих устройств

Звукоизоляция ограждений (стен, кожухов, экранов) должна обеспечивать снижение шума на рабочих местах до уровней, допустимых по нормам, во всех октавных полосах (см. табл. 7.1). Требуемая звукоизоляция  $R_{\text{тр}}$  рассчитывается для каждой конструкции помещения (стены, перекрытия, окна) для каждой из указанных октавных полос по следующим формулам:

1) при проникновении шума из одного помещения в другое:

$$R_{\text{тр}} = L - L_{\text{доп}} - 10 \cdot \lg (B_{\text{и}} / S) + 10 \cdot \lg n, \quad (7.3)$$

2) при проникновении шума с прилегающей территории в помещение:

$$R_{\text{тр}} = L - L_{\text{доп}} - 10 \cdot \lg (B_{\text{и}} / S) + 10 \cdot \lg n + 6, \quad (7.4)$$

3) при проникновении шума из помещения на прилегающую территорию:

$$R_{\text{тр}} = L - L_{\text{доп}} - 15 \cdot \lg r + 10 \cdot \lg S + 10 \cdot \lg n - 11, \quad (7.5)$$

4) при использовании звукоизолирующих кожухов

$$R_{\text{тр}} = L - L_{\text{доп}} - 10 \cdot \lg \alpha + 5. \quad (7.6)$$

где  $L$  – октавный уровень звукового давления в помещении, дБ;

$L_{\text{доп}}$  – допустимый октавный уровень звукового давления в защищаемом помещении, дБ;

$B_{\text{и}}$  – постоянная защищаемого от шума помещения,  $\text{м}^2$ ;

$S$  – площадь ограждающей конструкции, через которую проникает шум в помещение,  $\text{м}^2$ ;

$n$  – общее число ограждающих конструкций или их элементов, через которые проникает шум, шт;

$r$  – расстояние от ограждающей конструкции до источника шума, м;

$\alpha$  – коэффициент звукопоглощения внутренних поверхностей кожуха ( $\alpha = 0,5 \dots 0,7$ ).

Постоянная помещения  $B_{\text{и}}$  в октавных полосах частот определяется по формуле:

$$B_{\text{и}} = B_{1000} \cdot \mu, \quad (7.7)$$

где  $B_{1000}$  – постоянная помещения на среднегеометрической частоте 1000 Гц, определяемая по табл. 7.2 в зависимости от объема  $V$  и типа помещения;

$\mu$  – частотный множитель, определяемый по табл. 7.3.

Таблица 7.2

Определение постоянной помещения  $B_{1000}$

Описание помещения	$B_{1000}$
С небольшим числом людей (металлургическое производство, металлообрабатывающие цеха, машинные залы и т. п.)	$V/20$
С жесткой мебелью и большим числом людей или с небольшим числом людей и мягкой мебелью (лаборатории, кабинеты, деревообрабатывающие цехи и т. п.)	$V/10$
С большим числом людей и мягкой мебелью (конструкторские бюро, аудитории учебных заведений, операторские и т. п.)	$V/6$
Помещения со звукопоглощающей облицовкой потолка и части стен	$V/1,5$



Значения частотного множителя  $\mu$ 

Объем помещения, м <sup>3</sup>	Октавные полосы частот со среднегеометрическими частотами								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Менее 200	0,82	0,80	0,75	0,70	0,80	1,0	1,4	1,8	2,5
200 – 1000	0,67	0,65	0,62	0,64	0,75	1,0	1,5	2,4	4,2
Более 1000	0,52	0,50	0,50	0,55	0,70	1,0	1,6	3,0	6,6

Звукоизоляция сплошной преграды уменьшается при наличии в ней оконных и дверных проемов и определяется как:

$$R = R_c - \lg[1 + (S_0/S_c) \cdot (10^{0,1 \cdot (R_c - R_0)} - 1)], \quad (7.8)$$

где  $R_c$ ,  $R_0$  – звукоизоляция, соответственно, глухой части стены и окна или двери в данной октавной полосе частот, дБ;  
 $S_0$  – площадь окна или двери, м<sup>2</sup>;  
 $S_c$  – площадь стены, включая окно или дверь, м<sup>2</sup>.

Возможное снижение звукоизоляции необходимо учитывать при расчете звукоизолирующих устройств путем увеличения требуемой звукоизоляции на эту величину.

**Задача 7.1.** Рассчитать толщину звукоизолирующего ограждения, обеспечивающего снижение шума на рабочем месте до допустимых величин. Варианты заданий представлены в табл. 7.4. Уровни звукового давления для оборудования приведены в прил. 7.1.

#### Алгоритм расчета звукоизолирующего ограждения

1. Определить по прил. 7.1 и внести в табл. 7.5 значения  $L$ -уровней звукового ( $УЗД$ ) заданного оборудования – источника шума.

Таблица 7.5

Расчет звукоизолирующего ограждения

Величина	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц				
	125	250	500	1000	2000
$L$ (прил. 7.1)					
$L_{\text{доп}}$ (табл. 7.1)					
$\mu$ (табл. 7.3)					
$B_n = B_{1000} \cdot \mu$					
$B_n/S$					
$10 \lg (B_n / S)$					
$R_{\text{гр}}$					
$h$					

Варианты исходных данных к задаче 7.1

№	Источник шума	Характер изолируемого помещения	Размеры изолируемого помещения, м	Материал конструкции	Плотность материала г/см <sup>3</sup>	Примечание
1	Участок ДСП (5 т)	Лаборатория	36×18×6	Кирпич	1,6	–
2	Конвертор (100 т)	Производственное помещение	84×18×8	Железобетон	2,6	–
3	ДСП (200 т)	Административные службы	18×6×6	Кирпич	1,6	Окна 3 м <sup>2</sup>
4	Мологковая дробилка	Операторская	24×12×4	То же	1,6	Дверь 4 м <sup>2</sup>
5	Мартеновская печь (300 т)	Лаборатория	18×9×6	То же	1,6	–
6	Колпаковая печь	Производственное помещение	38×21×9	То же	1,6	–
7	Нагревательная печь	Диспетчерская служба	18×9×4	То же	1,6	Окна 6 м <sup>2</sup>
8	Агрегат резки листа	Пульт управления	8×6×4	То же	1,6	Окно 3 м <sup>2</sup> дверь 2 м <sup>2</sup>
9	Стан 450	Кабина наблюдения	15×6×4	То же	1,6	Окно 4 м <sup>2</sup>
10	Шаровая мельница	Производственное помещение	21×12×8	Железобетон	2,6	–
11	Участок формовки	Конструкторское бюро	18×9×6	Кирпич	1,6	–
12	Участок очистки литья	Производственное помещение	21×9×6	Железобетон	2,6	–
13	Инерционная решетка	Лаборатория	18×9×4	Кирпич	1,6	Дверь 3 м <sup>2</sup>
14	Термическая печь	Конструкторское бюро	20×6×4	Железобетон	2,6	–
15	Конвертор (350т)	Пульт управления	10×6×4	Кирпич	1,6	Окно 12 м <sup>2</sup>
16	Мартеновская печь (600 т)	Диспетчерская служба	15×6×4	Железобетон	2,6	–

Окончание табл. 7.4

№	Источник шума	Характер изолируемого помещения	Размеры изолируемого помещения, м	Материал конструкции	Плотность материала г/см <sup>3</sup>	Примечание
17	Агрегат продольной резки	Кабина наблюдения	9×6×6	Кирпич	1,6	Окно 6 м <sup>2</sup>
18	Дробилка ДР – 10	Лаборатория	12×9×4	То же	1,6	–
19	Вентиляционная камера цеха	Производственное помещение	36×18×9	Железобетон	2,6	–
20	ДСП (10 т)	Лаборатория	21×18×4	Кирпич	1,6	Дверь 3 м <sup>2</sup> , окно 4 м <sup>2</sup>
21	Участок бегунов	Диспетчерская служба	38×18×4	Кирпич	1,6	Окно 8 м <sup>2</sup>
22	ДСП (3 т)	Лаборатория	22×9×6	То же	1,6	–
23	Выбивная решетка	Диспетчерская	18×12×4	Кирпич	1,6	Окно 20 м <sup>2</sup>
24	Бегуны смесительные	Административное помещение	10×6×4	Кирпич	1,6	Дверь 2 м <sup>2</sup>
25	ДСП (200 т)	Производственное помещение	32×24×8	Железобетон	2,6	–

2. Исходя из характера заданного помещения, определить по табл. 7.1 и внести в табл. 7.5 допустимые значения УЗД для изолируемого помещения  $L_{\text{доп}}$ .

3. Рассчитать объем защищаемого помещения  $V$ ; определить по табл. 7.3 частотный множитель  $\mu$ , с учетом типа помещения определить по табл. 7.2 постоянную  $B_{1000}$ , вычислить постоянную помещения  $B_n$  в октавных полосах и внести в табл. 7.5.

4. Рассчитать площадь ограждения  $S$  (для упрощения расчета принять, что шум проникает через одну стену изолируемого помещения), найти для каждой октавы отношение  $B_n / S$  и значение  $10 \cdot \lg (B_n / S)$ ; внести значения в табл. 7.5.

5. По формуле (7.3) определить требуемую звукоизоляцию  $R_{\text{тр}}$  в октавных полосах. В случае необходимости следует учесть влияние на звукоизоляцию оконных и дверных проемов по формуле (7.8).

6. Определить из формулы (7.2) толщину материала однослойного ограждения для каждой октавы, считая, что значение  $L = R_{\text{тр}}$  и внести эти значения в табл. 7.5. Найти максимальное значение  $h$ .

Сделать заключение об эффективности звукоизолирующего ограждения.

**Задача 7.2.** Определить толщину стенки звукоизолирующего кожуха, который обеспечит снижение шума на постоянных рабочих местах в производственных помещениях до допустимых величин (см. табл. 7.1). Варианты заданий представлены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Варианты исходных данных к задаче 7.2

№ вар.	Источник шума	Материал кожуха	Звукопоглощающий материал (по табл. 7.8)
1	Осевой вентилятор	Сталь	2
2	Вентилятор 06-900	То же	3
3	Вентилятор ВУП	Алюминий	5
4	Радиальный вентилятор 4-70А	Дюралюминий	6
5	ВЦ – 4 – 75	Сталь	7
6	Вентилятор ВКР	Свинец	8
7	Вентилятор ВВД	Дюралюминий	9
8	ДСП-5	Листовая сталь	10
9	Редуктор	Сталь	11
10	ДСП – 10	Сталь	12
11	Молотковая дробилка	Сталь	13
12	Бегуны	Сталь	14
14	Шаровая мельница	Сталь	15

№ вар.	Источник шума	Материал кожуха	Звукопоглощающий материал (по табл. 7.8)
15	Редуктор СМ – 15	Сталь	16
16	Выбивная решетка	Сталь	3
17	Редуктор СМ – 174	Сталь	5
18	Дробилка ДР – 10	Сталь	6
19	ДСП – 3	Сталь	7
20	Вентилятор – 06-3	Дерево	8
21	Редуктор	Сталь	9
22	Бегуны	Сталь	11
23	ДСП – 5	Сталь	13
24	Шаровая мельница	Сталь	14

### Алгоритм расчета звукоизолирующего кожуха

1. Определить по прил. 7.1 и внести в табл. 7.7 значения  $L$ -уровней звукового (УЗД) заданного оборудования – источника шума.

Таблица 7.7

#### Расчет звукоизолирующего кожуха

Величина	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц				
	125	250	500	1000	2000
$L$ (прил. 7.1)					
$L_{\text{доп}}$ (табл. 7.1)					
$\alpha$					
$10 \cdot \lg \alpha$					
$R_{\text{тр}}$					
$h$					

2. Определить по табл. 7.1 и внести в табл. 7.7 допустимые значения УЗД для производственного помещения  $L_{\text{доп}}$ .

3. Определить по табл. 7.8 коэффициент звукопоглощения внутренних поверхностей кожуха  $\alpha$  в октавных полосах, рассчитать величину  $10 \cdot \lg \alpha$  и внести в табл. 7.7.

4. По формуле (7.6) определить требуемую звукоизоляцию  $R_{\text{тр}}$  в октавных полосах.

5. Определить из формулы (7.2) толщину материала кожуха для каждой октавы, считая, что значение  $L = R_{\text{тр}}$  и внести эти значения в табл. 7.7. Найти максимальное значение  $h$ .

Сделать заключение об эффективности звукоизолирующего кожуха.

### 7.3. Расчет звукопоглощающих устройств

Под *звукопоглощением* понимают свойство поверхностей уменьшать интенсивность отраженных ими звуковых волн за счет преобразования звуковой энергии в тепловую. *Коэффициент звукопоглощения* характеризует потерю энергии при отражении звуковой волны от твердой поверхности. Коэффициент звукопоглощения зависит от свойств поверхности, частоты звука и угла падения звуковых волн [2].

Наиболее распространенными звукопоглощающими материалами являются пористые волокнистые изделия и материалы, закрытые со стороны помещения перфорированными экранами, которые защищают звукопоглощающий материал от механических повреждений и обеспечивают удовлетворительный декоративный вид. Толщина звукопоглощающего материала принимается равной 50...100 мм.

Звукопоглощающие облицовки обычно размещают на потолке и стенах. Площадь обрабатываемой поверхности для достижения максимально возможного эффекта должна составлять не менее 60 % общей площади поверхностей. При необходимости снижения шума преимущественно в области низких частот, звукопоглощающие материалы следует располагать от поверхности стен на 100...150 мм, оставляя между потолком и стеной воздушный зазор.

В табл. 7.8 представлены коэффициенты звукопоглощения наиболее распространенных звукопоглощающих материалов.

Таблица 7.8

**Коэффициент звукопоглощения различных материалов**

Материал, изделие, конструкция, размеры	Толщина, мм	Коэффициент звукопоглощения ( $\alpha_{обл}$ ) при среднегеометрической частоте октавной полосы								
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1. Плиты марки ПА/О с несквозной перфорацией размером 500х500 мм	20	0,01	0,02	0,03	0,17	0,68	0,98	0,86	0,45	0,20
2. Плиты марки ПА-С	20	0,01	0,02	0,05	0,43	0,98	0,90	0,79	0,45	0,19
3. Минераловатные акустические плиты	20	0,15	0,02	0,05	0,21	0,66	0,91	0,95	0,89	0,70
4. Акустические плиты «Акминит»	20	0,15	0,02	0,11	0,30	0,85	0,90	0,78	0,73	0,59
5. Акустические плиты «Акмигран»	20	0,15	0,02	0,11	0,30	0,85	0,90	0,78	0,78	0,59
6. Плита АГП гипсовая с заполнением из минеральной ваты	20	0,01	0,03	0,09	0,26	0,54	0,94	0,67	0,40	0,39

Материал, изделие, конструкция, размеры	Толщина, мм	Коэффициент звукопоглощения ( $\alpha_{обл}$ ) при среднегеометрической частоте октавной полосы								
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
7. Минераловатная плита	60	0,01	0,01	0,31	0,70	0,95	1,00	0,69	0,50	0,30
8. Стеклоткань типа Э-01	60	0,05	0,10	0,31	0,70	0,95	0,69	0,59	0,50	0,30
9. Стальной войлок	30	0,15	0,30	0,35	0,36	0,40	0,50	0,75	0,70	0,68
10. Просечно-вытяжной лист	2	0,20	0,30	0,35	0,36	0,40	0,50	0,75	0,70	0,68
11. Просечно-вытяжной лист	60	0,15	0,25	0,30	0,35	0,45	0,80	0,85	0,96	0,95
12. Супертонкое стекловолокно	100	0,10	0,15	0,47	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96
13. Гипсовая плита, перфорация по квадрату	6	0,02	0,03	0,42	0,82	0,81	0,69	0,58	0,59	0,58
14. Просечно-вытяжной лист, перфорация 74 %	2	0,35	0,50	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15. Перфорированная алюминиевая панель	25	0,10	0,12	0,23	0,90	1,00	1,00	0,97	0,97	0,92
16. Прошивные минераловатные маты	100	0,10	0,10	0,35	0,75	1,00	0,95	0,90	0,92	0,95

Снижение шума звукопоглощающим материалом определяется по формуле:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg \frac{B_1 \cdot \psi_1}{B \cdot \psi}, \quad (7.9)$$

где  $B$  – постоянная помещения до обработки звукопоглощающим материалом и определяется по формуле (7.7);

$B_1$  – постоянная помещения после обработки помещения звукопоглощающим материалом;

$\psi$  и  $\psi_1$  – коэффициенты диффузности до и после обработки помещения, определяемые по рис. 7.1.

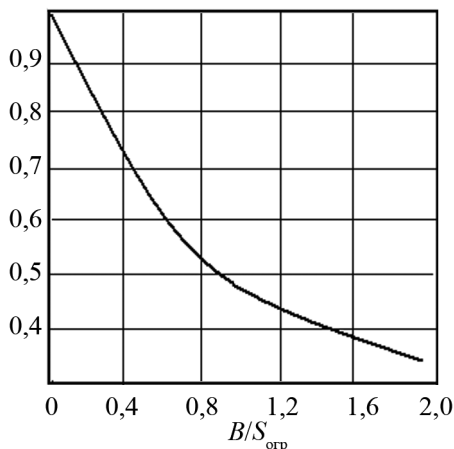


Рис. 7.1. Зависимость коэффициента диффузности  $\psi$  от постоянной помещения  $B$  и площади ограждения  $S_{огр}$

Постоянная помещения после обработки звукопоглощающим материалом определяют по формуле:

$$B_1 = \frac{A + \Delta A}{1 - \alpha_1}, \quad (7.10)$$

где  $A$  – суммарное звукопоглощение ограждающих конструкций,  $\text{м}^2$ ;  
 $\Delta A$  – звукопоглощение звукопоглощающих конструкций,  $\text{м}^2$ ;  
 $\alpha_1$  – коэффициент звукопоглощения помещения со звукопоглощающими конструкциями.

Суммарное звукопоглощение ограждающих конструкций определяется следующим образом:

$$A = \alpha \cdot (S_{огр} - S_{обл}), \quad (7.11)$$

где  $S_{огр}$  – площадь ограждающих конструкций,  $\text{м}^2$ ;  
 $S_{обл}$  – площадь звукопоглощающих конструкций,  $\text{м}^2$ ;  
 $\alpha$  – средний коэффициент звукопоглощения ограждающих конструкций, определяемый по формуле:

$$\alpha = \frac{B/S_{огр}}{B/S_{огр} + 1}, \quad (7.12)$$



Звукопоглощение звукопоглощающих конструкций определяется следующим образом:

$$\Delta A = \alpha_{\text{обл}} \cdot S_{\text{обл}} \quad (7.13)$$

Значения коэффициента  $\alpha_{\text{обл}}$  представлены в табл. 7.8.

Коэффициент звукопоглощения помещения со звукопоглощающими конструкциями рассчитывается по формуле:

$$\alpha_1 = (\Delta A + A) / S_{\text{огр}} \quad (7.14)$$

**Задача 7.3.** Определить снижение шума в производственных помещениях при использовании звукопоглощающих материалов. Варианты заданий представлены в табл. 7.9.

Таблица 7.9

Варианты исходных данных к задаче 7.3

Номер варианта (источник шума)	Размеры производственного помещения, м			Площадь облицов- ки, м <sup>2</sup>	Звукопоглощаю- щий материал (по табл. 7.8)
	Длина	Ширина	Высота		
1	84	18	6,2	2400	1
2	96	21	7,0	2700	2
3	75	18	6,2	2048	3
4	60	12	5,0	1048	4
5	84	24	7,8	2200	5
6	100	18	6,0	2600	6
7	120	21	8,5	3100	7
8	105	18	10,0	3200	8
9	85	12	6,0	1902	9
10	60	12	6,0	1300	10
11	150	30	12,0	4010	11
12	50	12	4,5	1450	12
13	45	12	4,5	1200	13
14	140	30	10,0	3200	14
15	130	18	8,5	2500	15
16	125	24	9,0	2805	16
17	120	24	8,0	3300	2
18	400	18	7,0	3200	4
19	90	18	6,0	2600	6
20	85	18	5,0	3000	8
21	100	24	6,5	2900	10
22	130	30	10,0	4200	12
23	110	16	10,0	2100	10
24	100	18	8,2	2500	12
25	130	24	12,0	3800	10

*Примечание:* Номер варианта соответствует источнику шума, указанного в прил. 7.1.

### **Алгоритм расчета звукопоглощающего устройства**

1. Определить по исходным данным площадь ограждающих поверхностей помещения  $S_{\text{огр}}$ , (площадь боковых стен).
2. Определить значения всех составляющих снижения шума по формулам (7.9) – (7.14) и последовательно занести в табл. 7.10;
3. Сделать вывод об эффективности звукопоглощающих устройств.

*Таблица 7.10*

#### **Расчет снижения шума звукопоглощающим устройством**

Величина	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц				
	31,5	125	500	2000	8000
$\mu$ (табл. 7.3)					
$B = B_{1000} \cdot \mu$					
$B/S_{\text{огр}}$					
$\psi$ (рис. 7.1)					
$\alpha_{\text{обл}}$ (табл. 7.6)					
$\Delta A = \alpha_{\text{обл}} \cdot S_{\text{обл}}$					
$\alpha = \frac{B/S_{\text{огр}}}{B/S_{\text{огр}} + 1}$					
$A = \alpha_{\text{обл}} \cdot (S_{\text{огр}} - S_{\text{обл}})$					
$A_1 = (A + \Delta A)/S_{\text{огр}}$					
$B_1 = (A + \Delta A)/(1 - \alpha_1)$					
$B_1/S_{\text{огр}}$					
$\Psi_1$ (рис. 7.1)					
$\Delta L = 10 \cdot \lg B_1 \cdot \Psi_1 / B \cdot \psi$					

### **Библиографический список**

1. СН 2.2.4/2.1.8.562.96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». – М.: Минздрав России, 1997 г.
2. Заборов В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. М.: Стройиздат, 1989. 180 с.

Уровни звукового давления в рабочей зоне оборудования

№	Наименование оборудования	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц															Уровни звука, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000							
1	ДСП (5 т)	107	118	119	112	116	111	103	97	65	118						
2	Конвертер (100 т)	88	95	100	103	107	107	107	103	96	111						
3	ДСП (200т)	103	127	125	123	129	123	120	114	103	126						
4	Молотковая дробилка	98	106	108	107	106	102	98	95	87	108						
5	Мареновая печь (300 т)	97	103	103	107	104	107	102	95	81	109						
6	Колпаковая печь	94	97	108	107	109	109	105	96	88	113						
7	Нагревательная печь	97	100	104	104	97	95	88	81	71	107						
8	Агрегат резки листа	94	105	108	110	11	112	113	115	114	116						
9	Стан 450, клеть	92	108	110	110	108	105	101	94	95	114						
10	Шаровая мельница	94	99	115	117	123	123	121	117	107	121						
11	Участок формовки	94	110	109	103	110	111	105	104	102	112						
12	Участок очистки литья	93	101	103	107	113	116	113	106	96	109						
13	Инерционная решетка	91	111	113	113	118	117	117	110	101	121						
14	Термическая печь	94	103	110	108	107	99	85	81	80	108						
15	Конвертор (350 т)	96	103	103	107	104	107	102	95	81	109						
16	Мареновая печь (600 т)	99	102	103	102	102	101	100	101	100	109						
17	Агрегат продольной резки	91	115	114	115	118	115	114	106	108	116						
18	Дробилка ДР – 10	88	106	108	107	106	102	98	95	87	108						
19	Вентиляционная камера цеха	91	110	113	121	119	118	117	117	114	126						
20	ДСП (10 т)	98	109	111	109	110	100	97	91	85	112						
21	Участок бегунов	93	100	103	102	97	90	88	85	89	97						
22	ДСП (3 т)	98	107	105	107	106	101	100	97	88	108						
23	Выбивная решетка	95	108	115	111	113	112	113	106	96	118						

№	Наименование оборудования	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц											Уровни звука, дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
24	Бегуны смесительные	86	108	104	104	113	99	95	86	79	109		
25	Осевой вентилятор	88	97	98	93	101	96	88	89	90	98		
26	Вентилятор 06-900	83	95	97	94	98	95	83	82	85	96		
27	Вентилятор ВУП	82	96	93	89	94	92	88	81	83	99		
28	Вентилятор ВКР	82	90	92	89	91	88	81	80	77	94		
29	Вентилятор ВВД	84	88	93	90	92	87	82	78	75	95		
30	Радиальный вентилятор ВЦ – 4 – 70	85	97	88	89	91	87	84	79	78	96		
31	ВЦ – 4 – 75	87	98	92	92	93	90	85	79	76	97		
32	Редуктор СМ – 15	95	101	103	104	107	110	109	104	95	113		
33	Редуктор СМ-174	91	99	101	102	107	99	98	88	89	112		

## 8. КАТЕГОРИРОВАНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ ПО ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

### 8.1. Основные понятия и определения

*Категорирование по взрывопожарной и пожарной опасности* – это установление категорий помещений и зданий (или частей зданий между противопожарными стенами – пожарных отсеков) производственного и складского назначения в соответствии с номенклатурой категорий и методикой их определения, регламентированными Федеральным законом от 22.07.2008 г. №123–ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1] и СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [2], в зависимости от количества и характеристик пожаровзрывоопасности находящихся (обращающихся) в них веществ и материалов с учетом особенностей технологических процессов, размещенных в них производств.

Категорирование помещений по взрывопожарной и пожарной опасности применяется для установления требований пожарной безопасности, направленных на предотвращение возможности возникновения пожара и обеспечение противопожарной защиты людей и имущества в случае возникновения пожара.

На основании категорирования по взрывопожарной и пожарной опасности устанавливают:

- нормативные требования по обеспечению взрывопожарной и пожарной безопасности помещений и зданий в отношении: планировки и застройки, необходимой площади легкосбрасываемых конструкций, этажности, площадей и мест размещения помещений, конструктивных решений размещения оборудования, выбора огнегасительных средств и противопожарной техники;
- проектные решения по огнестойкости зданий, сооружений и пожарных отсеков; противопожарным преградам и путям эвакуации людей из помещений и зданий;
- ширину противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями;
- проектные решения устройств и средств пожарной автоматики;
- проектные решения по обеспечению взрывопожарной и пожарной безопасности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и др.

Кроме того, категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности учитывается при установлении категорий по молниезащите, при определении класса взрывоопасных зон в соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ), при разработке мероприятий при проведении ремонтных (прежде всего, огневых) работ и в ряде других случаев.

*Категории* помещений по взрывопожарной и пожарной опасности принимают в соответствии с табл. 8.1.

Таблица 8.1

**Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности**

Категория помещений	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
А  повышенная взрывопожароопасность	Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ) с температурой вспышки не более 28 °С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа, и (или) вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа
Б  взрывопожароопасность	Горючие пыли или волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28 °С, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа
В1–В4  пожароопасность	Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть при условии, что помещения, в которых они находятся (обращаются), не относятся к категориям А или Б
Г  умеренная пожароопасность	Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени, и (или) горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива
Д  пониженная пожароопасность	Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии

Определение категорий помещений осуществляют путем последовательной проверки принадлежности помещения к категориям от наиболее опасной (А) к наименее опасной (Д).

## 8.2. Определение категорий помещений А и Б

Для расчета *избыточного давления взрыва* необходимо знать количество веществ, принимающих в нем участие. При определении количества вещества, принимающего участие во взрыве, считается, что происходит расчетная авария одного из аппаратов, все содержимое которого поступает в помещение, происходит одновременно утечка веществ из трубопроводов в течение времени, необходимого для их отключения, происходит испарение с поверхности разлившейся жидкости или с любых других открытых поверхностей. Предполагается, что во взрыве участвует пыль: поступающая из аппаратов в момент аварии; из трубопроводов, если они имеются; накопившаяся в помещении на поверхности оборудования и строительных конструкций.

Если в помещении одновременно присутствуют горючие пыли и ЛВЖ или горючие жидкости, избыточные давления взрыва каждого вида материалов суммируются и сопоставляются с граничным значением 5 кПа.

### 8.2.1. Расчет избыточного давления взрыва для горючих газов

Избыточное давление взрыва  $\Delta P$  (кПа) для *индивидуальных горючих веществ*, состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F определяется по формуле:

$$\Delta P = \frac{(P_{\max} - P_0) \cdot m \cdot Z \cdot 100}{V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot C_{\text{ст}} \cdot K_{\text{н}}}, \quad (8.1)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное давление взрыва стехиометрической газозвушной смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным [3]; при их отсутствии принимается равным 900 кПа;

$P_0$  – начальное давление, принимаемое равным 101 кПа;

$m$  – масса горючего газа, вышедшего при расчете в помещение, кг; вычисляемая по формуле (8.3);

$Z$  – коэффициент участия горючего газа во взрыве, принимаемый равным 1 для водорода и 0,5 – для других горючих газов;

$V_{\text{св}}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>; принимаемый равным 80 % объема помещения;  
 $\rho_{\text{г}}$  – плотность горючего газа при расчетной температуре, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C_{\text{ст}}$  – стехиометрическая концентрация горючего газа, % об.; вычисляемая по формуле:

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta}, \quad (8.2)$$

где  $\beta = n_{\text{C}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}}}{4} - \frac{n_{\text{O}}}{2}$  – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания ( $n_{\text{C}}$ ,  $n_{\text{H}}$ ,  $n_{\text{O}}$ ,  $n_{\text{X}}$  – число атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего);  
 $K_{\text{н}}$  – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, принимаемый равным 3.

Масса горючего газа  $m$  (кг), поступившего в помещение при расчетной аварии определяется по формуле:

$$m = (V_{\text{а}} + V_{\text{т}}) \cdot \rho_{\text{г}}, \quad (8.3)$$

где  $V_{\text{а}}$  – объем горючего газа, вышедшего из аппарата, м<sup>3</sup>;  
 $V_{\text{т}}$  – объем горючего газа, вышедшего из трубопровода, м<sup>3</sup>.

При этом

$$V_{\text{а}} = 0,01 \cdot P_1 \cdot V, \quad (8.4)$$

где  $P_1$  – давление в аппарате, кПа;  
 $V$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>;

$$V_{\text{т}} = V_{1\text{т}} + V_{2\text{т}}, \quad (8.5)$$

где  $V_{1\text{т}}$  – объем горючего газа, вышедшего из трубопровода до его отключения, м<sup>3</sup>;  
 $V_{2\text{т}}$  – объем горючего газа, вышедшего из трубопровода после его отключения, м<sup>3</sup>;

$$V_{1\text{т}} = q \cdot t, \quad (8.6)$$

где  $q$  – расход горючего газа в трубопроводе, м<sup>3</sup>/с;  
 $t$  – время отключения трубопровода, с.



$$V_{2т} = 0,01 \cdot \pi \cdot P_2 \cdot r^2 \cdot L, \quad (8.7)$$

где  $P_2$  – давление в трубопроводе, кПа;  
 $r$  – внутренний радиус трубопровода, м;  
 $L$  – длина трубопровода от аварийного аппарата до вентиля или задвижки, м.

Время отключения трубопровода  $t$  (с) принимается равным 120 с, если имеется система автоматического отключения, и равным 300 с при ручном отключении.

**Задача 8.1.** Провести категорирование по взрывопожарной и пожарной опасности помещения, в котором находится аппарат, работающий в проточном режиме в атмосфере водорода. В расчетах учесть, что при аварии в результате разрушения аппарата весь поступающий в помещение водород участвует во взрыве. Других горючих или взрывоопасных веществ и материалов в помещении нет, подача газа отключается автоматически.

Варианты заданий приведены в табл. 8.2. При расчетах учесть, что плотность водорода при 20 °С  $\rho_{H_2} = 0,083$  кг/м<sup>3</sup>.

#### *Алгоритм категорирования при наличии в помещении горючих газов*

1. Определить массу водорода, поступившего в помещение при аварии,  $m$  (кг) по формуле (8.3), для чего необходимо учесть объем водорода, вышедшего из аппарата  $V_a$  (м<sup>3</sup>) при аварии по формуле (8.4) и объем водорода, вышедшего из трубопровода до  $V_{1т}$  (м<sup>3</sup>) и после его отключения  $V_{2т}$  (м<sup>3</sup>) по формулам (8.5) – (8.7).

2. Определить свободный объем помещения  $V_{св}$  (м<sup>3</sup>), приняв его равным 80 % объема помещения.

3. Рассчитать стехиометрическую концентрацию водорода  $C_{ст}$  (% об.) по формуле (8.2), предварительно установив стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания  $\beta$ .

4. Определить величину расчетного избыточного давления взрыва  $\Delta P$  (кПа) по формуле (8.1).

5. Сопоставить полученное расчетное значение избыточного давления взрыва  $\Delta P$  (кПа), определенное по формуле (8.1) со значением избыточного давления взрыва, указанным в табл. 8.1. На основании этого установить категорию помещения по взрывопожарной опасности.

Таблица 8.2

Варианты исходных данных к задаче 8.1

№ варианта	Объем аппарата $V$ , м <sup>3</sup>	Давление в аппарате $P_1$ , кПа	Давление в трубопроводе $P_2$ , кПа	Внутренний радиус трубопровода $r$ , м	Длина трубопровода от аппарата до вентиля $L$ , м	Объем помещения $V_{пом}$ , м	Расход горючего газа в трубопроводе $q$ , м <sup>3</sup> /с
1	2,0	160	200	0,030	20	250	0,010
2	2,5	150	200	0,020	10	300	0,005
3	3,0	200	300	0,020	20	400	0,020
4	2,5	150	220	0,010	15	350	0,003
5	3,5	150	250	0,020	15	350	0,010
6	2,5	120	150	0,020	10	400	0,020
7	2,5	160	300	0,020	12	450	0,030
8	2,0	150	200	0,030	15	800	0,004
9	3,0	200	250	0,020	20	700	0,050
10	4,0	180	220	0,020	15	600	0,003
11	4,0	150	200	0,030	20	500	0,020
12	3,0	200	250	0,030	15	450	0,005
13	2,5	180	190	0,020	10	400	0,002
14	5,0	150	200	0,015	10	450	0,003
15	4,0	170	200	0,015	15	500	0,006
16	3,0	120	130	0,020	12	250	0,004
17	2,5	130	160	0,040	14	600	0,050
18	2,0	140	170	0,020	10	700	0,020
19	3,7	165	185	0,015	15	650	0,005
20	3,2	160	180	0,025	22	750	0,010
21	3,3	145	195	0,030	7	420	0,005
22	2,7	150	190	0,025	8	450	0,002
23	1,6	120	200	0,030	12	500	0,010
24	1,9	140	160	0,020	17	450	0,005
25	6,0	150	200	0,050	20	1000	0,040

## 8.2.2. Расчет избыточного давления взрыва для горючих пылей

Расчет избыточного давления  $\Delta P$  (кПа) при взрыве *горючих порошков и пылей* может быть выполнен по формуле:

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_0 \cdot Z}{V_{св} \cdot \rho_v \cdot C_p \cdot T_0 \cdot K_H}, \quad (8.8)$$

где  $m$  – масса взвешенной в объеме помещения пыли, образовавшейся в результате аварийной ситуации, кг; определяется по формуле (8.9);  
 $H_T$  – теплота сгорания материала (горючей пыли), Дж/кг;  
 $P_0$  – начальное давление, принимаемое равным 101 кПа;  
 $Z$  – коэффициент участия взвешенной пыли во взрыве, следует принимать равным 1 для порошков металлов и сплавов (в том числе и порошков кремния);  
 $V_{св}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>, принимаемый равным 80 % объема помещения;  
 $\rho_v$  – плотность воздуха до взрыва при температуре  $T_0$ , кг/м<sup>3</sup>;  
 $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха, принимается равной  $1,01 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  
 $T_0$  – начальная температура воздуха, К.  
 $K_H$  – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, принимаемый равным 3 для больших помещений (например, здание мастерской или цеха, имеющем большую площадь проемов), и равный 2 для относительно небольших помещений (камеры вентиляционных установок, помещение для установки фильтров или циклонов и т.п.);

Массу взвешенной в объеме помещения пыли  $m$  (кг), образовавшейся в результате аварийной ситуации, определяют по формуле:

$$m = m_{вз} + m_{ав}, \quad (8.9)$$

где  $m_{вз}$  – масса взвихрившейся пыли, кг;

$m_{ав}$  – масса пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации, кг.

Массу взвихрившейся пыли  $m_{вз}$  (кг) определяют по формуле:

$$m_{вз} = K_{вз} \cdot m_{п}, \quad (8.10)$$

где  $K_{вз}$  – доля отложившейся в помещении пыли, способной перейти во взвешенное состояние в результате аварийной ситуации, в отсутствие экспериментальных сведений допускается принимать  $K_{вз}=0,9$ ;  
 $m_{п}$  – масса отложившейся в помещении пыли к моменту аварии, кг.

Массу пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации,  $m_{ав}$  (кг) определяют по формуле:

$$m_{ав} = m_{ап} \cdot K_{п}, \quad (8.11)$$

где  $m_{ап}$  – масса горючей пыли, выбрасываемой в помещение из аппарата, кг;

$K_{п}$  – коэффициент пыления, представляющий отношение массы взвешенной в воздухе пыли ко всей массе пыли, поступившей из аппарата в помещение (в отсутствие экспериментальных сведений о величине  $K_{п}$  допускается принимать для пылей с дисперсностью не менее 350 мкм  $K_{п}=0,5$ ; для пылей с дисперсностью менее 350 мкм  $K_{п}=1,0$ ).

Масса отложившейся в помещении пыли к моменту аварии  $m_{п}$  (кг):

$$m_{п} = \frac{K_{г}}{K_{у}} \cdot (m_1 + m_2), \quad (8.12)$$

где  $K_{г}$  – доля горючей пыли в общей массе отложений пыли;

$K_{у}$  – коэффициент эффективности пылеуборки (принимается при сухой пылеуборке равным 0,6; при влажной пылеуборке – 0,7; при механизированной вакуумной пылеуборке – 0,9);

$m_1$  – масса пыли, оседающей на труднодоступных для уборки поверхностях в помещении за период времени между генеральными уборками, кг;

$m_2$  – масса пыли, оседающей на доступных для уборки поверхностях в помещении за период времени между текущими уборками (ежесменно, ежесуточно и т.п.), кг;

Масса пыли  $m_i$  ( $i=1;2$ ) (кг), оседающей на различных поверхностях в помещении за межуборочный период, определяется по формуле:

$$m_i = M_i \cdot (1 - \alpha) \cdot \beta_i, \quad (8.13)$$

где  $M_i$  – масса пыли, оседающей на различных поверхностях в помещении за период между генеральными ( $i=1$ ) и текущими ( $i=2$ ) пылеуборками, кг;

$\alpha$  – доля выделяющейся в объем помещения пыли, которая удаляется вытяжными вентиляционными системами (при отсутствии данных принимается  $\alpha=0$ );

$\beta_1, \beta_2$  – доли выделяющейся в объем помещения пыли, оседающей соответственно на труднодоступных и доступных для уборки поверхностях помещения ( $\beta_1 + \beta_2 = 1$ ). При отсутствии сведений допускается принимать  $\beta_1 = 1$  и  $\beta_2 = 0$ .

**Задача 8.2.** Рассчитать избыточное давление взрыва в помещении, в котором производится размол кремния в порошок с размером частиц менее 100 мкм. В помещении отсутствуют какие-либо другие взрывоопасные и горючие вещества и материалы. Дробильно-размольное оборудование периодического действия.

При расчетах учесть: теплота горения кремния  $H_T = 3,24 \cdot 10^7$  Дж/кг; температура воздуха 293 К, плотность воздуха 1,206 кг/м<sup>3</sup>. Варианты заданий приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

## Варианты исходных данные к задаче 8.2

№ варианта	Масса пыли кремния в аппаратах $m_{\text{дп}}$ , кг	Масса пыли кремния, оседающая в помещении между генеральными пылеуборками $M_1$ , кг	Масса пыли кремния, оседающая в помещении между текущими пылеуборками $M_2$ , кг	Тип пылеуборки	Объем помещения $V_{\text{пом}}$ , м <sup>3</sup>
1	100	15	4,5	сухая	15000
2	60	10	4,0	влажная	12000
3	80	20	7,0	вакуумная	15000
4	40	10	3,5	влажная	20000
5	30	5	2,0	вакуумная	10000
6	20	5	2,5	сухая	12000
7	25	5	1,8	сухая	12000
8	30	6	2,0	вакуумная	10000
9	50	4	1,0	влажная	13000
10	60	10	4,8	сухая	15000
11	120	20	8,7	вакуумная	20000
12	100	16	10,0	сухая	25000
13	80	15	7,5	влажная	60000
14	75	9	3,0	вакуумная	10000
15	55	6	2,5	влажная	15000
16	60	4	1,6	вакуумная	20000
17	70	5	2,2	сухая	25000
18	50	5	2,3	вакуумная	30000
19	40	4	2,0	вакуумная	35000
20	35	6	2,5	влажная	40000
21	45	8	4,0	влажная	45000
22	65	9	5,1	сухая	50000
23	100	10	6,2	вакуумная	50000
24	120	15	9,5	влажная	40000
25	110	20	11,0	сухая	35000

**Алгоритм категорирования  
при наличии в помещении горючих пылей**

1. Определить массу пыли  $m_i$  ( $i = 1; 2$ ) (кг), оседающей на различных поверхностях в помещении за междуборочный период по формуле (8.13).
2. Определить массу отложившейся в помещении пыли к моменту аварии  $m_{п}$  (кг) по формуле (8.12), считая всю пыль в помещении горючей.
3. Определить массу взвихрившейся пыли  $m_{вз}$  (кг) по формуле (8.10).
4. С учетом дисперсности пыли по формуле (8.11) определить массу пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации,  $m_{ав}$  (кг).
5. Рассчитать массу взвешенной в объеме помещения пыли  $m$  (кг), образовавшейся в результате аварийной ситуации по формуле (8.9).
6. Определить свободный объем помещения  $V_{св}$  (м<sup>3</sup>), приняв его равным 80 % объема помещения.
7. Определить величину расчетного избыточного давления  $\Delta P$  (кПа) при взрыве горючих порошков и пылей по формуле (8.8).
8. Сопоставить полученное расчетное значение избыточного давления взрыва  $\Delta P$  (кПа), определенное по формуле (8.8) со значением избыточного давления взрыва, указанным в таблице 8.1. На основании этого установить категорию помещения по взрывопожарной опасности.

### 8.3. Определение категорий помещений В1–В4

В случае, когда обоснован вывод об отнесении помещения к категории В, необходимо решить вопрос о выборе разновидностей пожароопасной категории В1–В4.

Определение категории помещения В1–В4 осуществляется путем сравнения максимального значения удельной временной пожарной нагрузки (далее – пожарная нагрузка) на любом из участков с величиной удельной пожарной нагрузки, приведенной в табл. 8.4.

Таблица 8.4

**Определение категории пожароопасных помещений**

Наименование категории	Удельная пожарная нагрузка $q$ , МДж/м <sup>2</sup>
В1	Более 2200
В2	1401...2200
В3	181...1400
В4	1...180

Пожарная нагрузка  $Q$  (МДж) помещений может включать в себя различные сочетания (смесь) легковоспламеняющихся, горючих и труднотлеющих жидкостей и твердых материалов и определяется по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n G_i \cdot Q_{ni}^p, \quad (8.14)$$

где  $G_i$  – количество  $i$ -того материала пожарной нагрузки, кг;  
 $Q_{ni}^p$  – низшая теплота сгорания  $i$ -того материала пожарной нагрузки, МДж/кг (см. табл. 8.5).

Таблица 8.5

**Теплоты сгорания пожароопасных материалов**

Материал или вещество	Низшая теплота сгорания материала, кДж/кг
Алюминий	31087
Ацетон	31360
Бензин	45700
Бензол	40630
Бумага	20000
Дерево	19000
Керосин	42900
Кремний	32430
Магний	25104
Толуол	40936
Резина	27000
Фенол	31790
Этанол	30608
Полиэтилен	46582

Удельная пожарная нагрузка  $q$  (МДж/м<sup>2</sup>) определяется по формуле:

$$q = \frac{Q}{S}, \quad (8.15)$$

где  $Q$  – пожарная нагрузка, МДж;  
 $S$  – площадь размещения пожарной нагрузки, м<sup>2</sup> (но не менее 10 м<sup>2</sup>).

Если при определении категорий В2 или В3 количество пожарной нагрузки  $Q$  (МДж), определенное по формуле (8.14), отвечает неравенству (8.16), то помещение будет относиться к категориям В1 или В2 соответственно.

$$Q \geq 0,64 \cdot q_T \cdot H^2, \quad (8.16)$$

где  $q_T$  – максимальное значение удельной пожарной нагрузки для проверяемой категории ( $q_T=2200$  МДж/м<sup>2</sup> при проверке В2;  $q_T=1400$  МДж/м<sup>2</sup> при проверке В3);  
 $H$  – высота помещения, м.



**Задача 8.3.** По исходным данным, приведенным в табл. 8.6, определить категорию помещения В1–В4.

Таблица 8.6

**Варианты исходных данных к задаче 8.3**

№ варианта	Количество пожароопасных материалов, находящихся в помещении, кг				Площадь помещения $S$ , м <sup>2</sup>	Высота помещения $H$ , м
	дерево	бумага	порошок алюминия	резина		
1	100	50	20	10	20	3,5
2	85	30	15	15	30	3,0
3	90	35	10	20	25	3,5
4	70	35	12	15	12	4,0
5	90	30	14	10	14	2,5
6	95	25	16	5	16	2,7
7	100	40	18	7	18	2,9
8	85	30	20	9	20	3,1
9	50	35	22	11	18	3,3
10	60	40	24	13	17	3,5
11	40	45	26	15	15	3,7
12	45	50	28	17	13	3,9
13	50	55	30	19	11	4,0
14	55	60	10	21	10	3,5
15	60	55	12	20	12	3,0
16	65	50	14	18	14	2,5
17	70	45	16	16	16	3,5
18	75	40	18	14	18	3,3
19	80	35	20	12	20	3,5
20	85	30	22	10	22	3,5
21	90	35	24	8	24	3,5
22	95	40	26	13	26	3,5
23	100	45	28	15	28	3,3
24	105	50	30	18	30	3,5
25	110	55	35	20	35	3,5

**Алгоритм отнесения помещения к категории В**

1. Для каждого пожароопасного материала, находящегося в помещении установить его теплоту сгорания по таблице 8.5.
2. Рассчитать величину пожарной нагрузки  $Q$  (МДж) помещения по формуле (8.14).
3. Определить величину удельной пожарной нагрузки  $q$  (МДж/м<sup>2</sup>) по формуле (8.15).
4. По величине удельной пожарной нагрузки установить категорию помещения по пожарной опасности по таблице 8.4.

5. В случае, если установленная категория по пожарной опасности – В2 или В3, необходимо проверить выполнение условия (8.16). Если это условие выполняется, то необходимо повысить категорию (с В2 до В1 или с В3 до В2).

### **Библиографический список**

1. Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 г. №123–ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» / Российская газета, № 4720 от 1 августа 2008 г.

2. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» – М.: Проспект, 2010 г.

3. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средств их тушения. Справ. изд.: 2 кн. / Под ред. А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко. – М.: Химия, 1990 г.

*Учебное издание*

Зиновьева Ольга Михайловна  
Мастрюков Борис Степанович  
Меркулова Анна Михайловна  
Муравьев Виктор Александрович  
Овчинникова Татьяна Игоревна  
Потоцкий Евгений Павлович  
Смирнова Наталья Андреевна

## **БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

### **Учебное пособие**

Компьютерная верстка *А.С. Анциферовой*

---

Подписано в печать 10.09.13	Бумага офсетная	
Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Печать офсетная	Уч.-изд. л. 9,1
Рег. № 453	Тираж 150 экз.	Заказ 3999

---

Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4

Издательский Дом МИСиС,  
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4  
Тел. (495) 638-45-22

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС  
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4  
Тел. (499) 236-76-17, тел./факс (499) 236-76-35