

**Владимирский государственный университет**

# **БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**Учебное пособие**

**Владимир 2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

# БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Учебное пособие

*Электронное издание*



Владимир 2023

ISBN 978-5-9984-1545-6

© ВлГУ, 2023

УДК 614.8

ББК 68.9

**Авторы-составители:**

А. В. Толков (гл. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9)

Е. А. Баландина (гл. 4)

Н. И. Туманова (гл. 5)

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры тепловых двигателей и энергетических установок  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*С. Г. Драгомиров*

Начальник бюро охраны труда и окружающей среды  
ООО «Орион-Р»  
*М. В. Тимохин*

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Безопасность** жизнедеятельности [Электронный ресурс] : учеб. пособие / авт.-сост.: А. В. Толков, Е. А. Баландина, Н. И. Туманова ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – 454 с. – ISBN 978-5-9984-1545-6. – Электрон. дан. (13,7 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-R. – Загл. с титул. экрана.

Содержится вся необходимая информация для изучения дисциплины «Безопасность жизнедеятельности».

Предназначено для студентов бакалавриата всех направлений и форм обучения, изучающих указанную дисциплину, может быть использовано при подготовке ВКР студентами, обучающимися по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 172. Ил. 77. Библиогр.: 45 назв.

ISBN 978-5-9984-1545-6

© ВлГУ, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	8
-----------------------	---

<b>Глава 1. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ РАССЕЙВАНИЯ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ (ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ) ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ</b> .....	9
---	---

1. Область применения Методов .....	9
2. Обозначения .....	9
3. Сокращения .....	9
4. Общие положения.....	10
5. Метод расчета максимальных разовых концентраций от выбросов одиночного точечного источника.....	12
6. Метод расчета рассеивания выбросов ЗВ из аэрационного фонаря в атмосферном воздухе.....	21
7. Учет влияния рельефа местности при расчете рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе .....	23
8. Метод расчета максимальных разовых концентраций ЗВ в атмосферном воздухе выбросами групп точечных, линейных и площадных источников выбросов.....	26
9. Метод расчета рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе с учетом влияния застройки.....	35
10. Метод расчета долгопериодных средних концентраций ЗВ в атмосферном воздухе.....	54
11. Метод учета фоновых концентраций загрязняющих веществ при расчетах загрязнения атмосферного воздуха и определение фона расчетным путем .....	68
12. Методы расчетов рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе от источников выбросов различного типа.....	72
Контрольные вопросы.....	78

<b>Глава 2. ВЕНТИЛЯЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ, ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ</b> .....	80
--	----

2.1. Естественная вентиляция (аэрация) .....	80
2.2. Механическая вентиляция.....	86

2.2.1. Расчет необходимого воздухообмена в производственных помещениях .....	87
2.2.2. Расчет избыточных тепловыделений в производственных помещениях, в зданиях жилого и общественного назначения.....	88
2.2.3. Расчет сети воздуховодов .....	90
2.2.4. Подбор вентиляторов и электродвигателей .....	96
2.2.5. Расчет системы местной вытяжной механической вентиляции .....	102
2.2.6. Справочные таблицы .....	108
2.3. Воздушные завесы.....	119
2.3.1. Конструктивные требования .....	119
2.3.2. Расчет воздушных завес (завесы шибберного типа) .....	123
2.3.3. Завесы смешивающего типа .....	130
2.4. Воздушное душирование (кондиционирование) .....	133
2.5. Порядок расчета систем аспирации.....	139
2.6. Расчет местных воздухоприемников, встроенных в оборудование для пайки и лужения .....	150
2.6.1. Общие положения .....	150
2.6.2. Исходные данные для определения количества выделяющихся вредных веществ .....	151
2.6.3. Исходные данные для конструирования и расчета местной вентиляции установок пайки и лужения .....	152
2.6.4. Данные для конструирования и расчета местной вентиляции оборудования по изготовлению печатных плат .....	165
2.6.5. Пример расчета .....	172
2.7. Подбор циклонов АО «НИИОГАЗ» для очистки выбросов предприятий от пыли.....	174
2.7.1. Общие положения .....	174
2.7.2. Методика расчета и подбора циклонов.....	181
2.7.3. Пример подбора циклона для системы вентиляции участка механического цеха .....	185
Контрольные вопросы.....	187
<b>Глава 3. ЗАЩИТА ОТ ВИБРАЦИИ .....</b>	<b>188</b>
3.1. Расчет виброизоляции.....	190
3.2. Расчет пружинных виброизоляторов .....	193

3.3. Расчет резиновых виброизоляторов .....	201
Контрольные вопросы.....	203
<b>Глава 4. БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....</b>	<b>204</b>
4.1. Общие положения .....	204
4.2. Пример расчета .....	215
4.3.Справочные таблицы .....	216
Контрольные вопросы.....	223
<b>Глава 5. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ .....</b>	<b>225</b>
5.1. Основные светотехнические характеристики .....	225
5.2. Системы и виды производственного освещения .....	226
5.3. Источники света и осветительные приборы.....	227
5.4. Выбор метода расчета освещения .....	228
5.4.1. Метод коэффициента использования светового потока .....	228
5.4.2. Алгоритм расчета освещения методом коэффициента использования светового потока.....	230
5.4.3. Пример расчета освещения методом коэффициента использования светового потока.....	239
5.4.4. Расчет освещения точечным методом.....	246
5.4.5. Пример расчета освещения точечным методом.....	248
5.4.6. Светящиеся линии .....	255
5.4.7. Примеры расчета освещения с учетом светящихся линий .....	266
5.5. Естественное освещение.....	271
5.6. Задания для самостоятельных расчетов естественного и искусственного освещения .....	279
5.7. Справочные таблицы .....	284
Контрольные вопросы.....	303
<b>Глава 6. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ОПАСНОСТИ И ВРЕДНОСТИ, ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ .....</b>	<b>304</b>
6.1. Анализ травматизма и количественные характеристики риска ....	304
6.2. Коэффициент тяжести травматизма .....	305
6.3. Качественные и количественные характеристики риска .....	305
6.4. Показатель опасности .....	307
6.5. Коэффициент насыщенности механизмами производственной площади.....	307
6.6. Определение опасных зон и работ с повышенной опасностью.....	308

6.7. Примерный перечень мест (условий) производства и видов работ, на выполнение которых необходимо выдавать наряд-допуск.....	312
Контрольные вопросы.....	313

**Глава 7. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАСШТАБОВ ЗАРАЖЕНИЯ СИЛЬНОДЕЙСТВУЮЩИМИ ЯДОВИТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ ПРИ АВАРИЯХ (РАЗРУШЕНИЯХ) НА ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ И ТРАНСПОРТЕ ..... 314**

7.1. Общие положения .....	314
7.2. Порядок расчета прогнозирования глубины зоны заражения СДЯВ на случай аварии .....	315
7.3. Порядок расчета прогнозирования глубины зоны заражения СДЯВ при разрушении опасного объекта.....	322
7.4. Порядок расчета определения площади зоны заражения .....	322
7.5. Порядок расчета определения времени подхода зараженного воздуха к жилым зонам, населенным пунктам и другим объектам.....	323
7.6. Порядок расчета определения времени подхода поражающего действия СДЯВ .....	323
7.7. Пример расчета прогнозирования масштабов заражения СДЯВ при аварии.....	324
Контрольные вопросы.....	325

**Глава 8. ШУМ ..... 326**

8.1. Общие положения и параметры звукоизлучения .....	326
8.2. Расчет звукоизолирующего кожуха промышленного оборудования.....	328
8.3. Оценка шумового фона транспортных потоков в жилой застройке городов .....	345
8.3.1. Общие положения .....	345
8.3.2. Порядок расчета.....	346
8.3.3. Пример расчета .....	356
8.4. Расчет шумового режима в помещениях .....	357
8.4.1. Общие понятия и определения .....	357
8.4.2. Расчет звукоизоляции ограждающих конструкций.....	361
8.4.3. Расчет и выбор конструкций звукопоглощающей облицовки ...	364
8.4.4. Примеры расчетов .....	365

8.5. Расчет глушителей шума автотранспорта .....	376
8.6. Расчет шума, создаваемого струей реактивного двигателя .....	382
8.7. Акустический расчет системы вентиляции .....	386
Контрольные вопросы.....	389
<b>Глава 9. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ .....</b>	<b>391</b>
9.1. Общие понятия. Техническое нормирование.....	391
9.2. Природные источники электромагнитных полей .....	394
9.3. Антропогенные источники электромагнитных полей .....	394
9.3.1. Источники электромагнитных полей промышленной частоты в жилых помещениях .....	395
9.3.2. Источники электромагнитных полей диапазона 3 кГц – 300 ГГц.....	397
9.4. Способы защиты от электромагнитных полей.....	404
9.4.1. Экранирование. Расчет экранов.....	405
9.4.2. Поглощающие экраны .....	406
9.4.3. Отражающие экраны .....	407
9.5. Воздействие на человека и нормирование электромагнитных полей .....	410
9.6. Нормирование воздействия электромагнитного излучения радиочастот.....	411
9.7. Защита от статических полей и излучений промышленной частоты.....	412
9.8. Средства защиты от электромагнитных излучений радиочастот.....	413
9.9. Экранирование электромагнитных полей. Расчет и конструирование защитных экранов.....	415
9.10. Задание для самостоятельных расчетов.....	420
Контрольные вопросы.....	422
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>423</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>424</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>429</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Безопасность жизнедеятельности – наука о сохранении здоровья и безопасности человека в среде обитания, призванная выявлять и идентифицировать опасные и вредные факторы, разрабатывать методы и средства защиты человека путем снижения опасных и вредных факторов до приемлемых значений.

Цель курса – вооружить будущих специалистов теоретическими знаниями и практическими навыками, необходимыми для создания условий деятельности, отвечающих современным требованиям по экологии и безопасности.

Содержание курса – теоретические основы безопасности жизнедеятельности.

В дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» рассматриваются следующие темы: методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе; вентиляция промышленных помещений, жилых и общественных зданий; защита от вибрации; безопасность лазерного излучения; производственное освещение; производственные опасности и вредности, их идентификация и анализ; прогнозирование масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами (СДЯВ) при авариях на опасных объектах и транспорте; шум и защита от электромагнитных полей.

Курс базируется на знаниях, полученных студентами при изучении социальных, общенаучных, общинженерных дисциплин, и призван обеспечить обучение бакалавра, способного самостоятельно решать вопросы безопасности жизнедеятельности при выполнении своих профессиональных функций.

# **Глава 1. МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ РАССЕИВАНИЯ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ (ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ) ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

## **1. Область применения Методов [1]**

Настоящие Методы применяются для выполнения расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферном воздухе в двухметровом слое над поверхностью Земли на расстоянии не более 100 км от источника выброса, а также вертикального распределения концентраций ЗВ:

- при определении нормативов выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух;
- разработке перечня мероприятий по охране окружающей среды в составе разделов проектной документации;
- обосновании ориентировочных размеров санитарно-защитных зон;
- разработке и обосновании организационно-технических мероприятий, оказывающих влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха, при оценке их результатов;
- оценке воздействия намечаемой хозяйственной или иной деятельности на качество атмосферного воздуха;
- оценке краткосрочных и долгосрочных уровней загрязнения атмосферного воздуха и соответствующих концентраций загрязняющих атмосферу веществ, создаваемых всеми источниками выброса, исключая рассматриваемые (непосредственно учитываемые в расчете рассеивания выбросов) (далее – фоновые концентрации ЗВ).

## **2. Обозначения [Там же]**

Обозначения для выполнения расчетов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух приведены в прил. 1.

## **3. Сокращения [Там же]**

В настоящих Методах расчетов применены следующие сокращения:

- ГВС – газозоодушная (пылегазоодушная) смесь;
- ЗВ – загрязняющее вещество;

- ПДВ – предельно допустимый выброс;
- ПДК – предельно допустимая концентрация;
- ПДК<sub>м.р</sub> – ПДК для максимальной из разовых концентраций ЗВ в атмосферном воздухе;
- ПДК<sub>сс</sub> – ПДК для среднесуточной концентрации ЗВ в атмосферном воздухе;
- ПДК<sub>сг</sub> – ПДК для среднегодовой концентрации ЗВ в атмосферном воздухе;
- СЗЗ – санитарно-защитная зона.

#### 4. Общие положения [1]

##### 4.1. Методы позволяют рассчитать поля:

- максимальных разовых концентраций ЗВ  $c_m$ , соответствующих сочетанию неблагоприятных метеорологических условий, в том числе опасной скорости ветра и неблагоприятных условий выброса ЗВ в атмосферный воздух, т. е. такого сочетания мощностей и других параметров выброса ЗВ в атмосферный воздух (высота, диаметр устья, расход ГВС, температура ГВС, скорость выхода ГВС из устья, мощность выброса), при котором в условиях соблюдения промышленным предприятием установленного режима работы достигаются максимальные значения максимальных приземных концентраций (далее – неблагоприятные условия выброса ЗВ в атмосферный воздух);
- безразмерных концентраций  $q_k$  ЗВ в атмосферном воздухе групп веществ комбинированного вредного действия (полной суммы, неполной суммы, потенцирования);
- средних концентраций ЗВ в атмосферном воздухе, соответствующих длительному (сезон, год) времени осреднения, в частности, среднегодовых, концентраций  $C$  ЗВ в атмосферном воздухе (далее – долгопериодные средние концентрации ЗВ в атмосферном воздухе).

4.2. При совместном присутствии в атмосферном воздухе нескольких веществ, обладающих суммацией действия, для всех расчетных точек на местности по формуле (1) определяется безразмерная концентрация ЗВ в атмосферном воздухе  $q_k$  рассматриваемого загрязняющего вещества

$$q_k = \sum_{i=1}^{n_{з.в}} \frac{c_i}{\text{ПДК}_{\text{м.р.}i}}, \quad (1)$$

где  $n_{з.в}$  – число ЗВ, входящих в группу комбинированного вредного действия;

$c_i$  – рассчитанная в соответствии с требованиями настоящих Методов (относящаяся ко времени осреднения 20 – 30 мин) концентрация  $i$ -го ЗВ, входящего в рассматриваемую группу ЗВ комбинированного вредного действия в миллиграммах на кубический метр ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ).

4.3. Расчет максимальных разовых и среднегодовых концентраций ЗВ, претерпевающих в атмосферном воздухе химические превращения (трансформацию) в более вредные ЗВ, должен проводиться по каждому исходному и образующемуся веществу отдельно. При этом коэффициенты трансформации, используемые при расчете максимальных разовых и среднегодовых концентраций ЗВ, могут различаться. При расчетах максимальных разовых концентраций коэффициент трансформации для каждого вещества устанавливается с учетом максимально возможной трансформации исходных веществ в более токсичные.

4.4. В зависимости от высоты  $H$  установленного отверстия, через которое содержащая ЗВ пылегазовоздушная смесь поступает в атмосферный воздух (далее – устье источника выброса), источники выбросов относятся к наземным (при  $H$  до 2 м включительно), низким (от 2 до 10 м включительно), средней высоты (от 10 до 50 м включительно), высоким (свыше 50 м).

Для наземных источников выбросов высота  $H$  при расчетах по формулам, приведенным в настоящих Методах, принимается равной 2 м.

4.5. В формулах, приведенных в настоящих Методах, используются следующие единицы величин: единицы длины – в метрах (м), время – в секундах (с), мощность выброса ЗВ – в граммах в секунду (г/с), его концентрация в атмосферном воздухе – в миллиграммах на кубический метр ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ).

4.6. Климатические параметры, необходимые для реализации расчетов, устанавливаются по климатическим данным, опубликованным для всеобщего доступа (в том числе климатическим справочникам) или предоставленным по заказу организациями, выполняющими работы по определению климатологических характеристик окружающей среды на основании лицензии на осуществление деятельности в области гидрометеорологии и в смежных с ней областях (за исключением указанной деятельности, осуществляемой в ходе инженерных

изысканий, выполняемых для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства). Качество, объем и способы обработки используемых при этом данных метеорологических наблюдений должны соответствовать обязательным метрологическим требованиям к измерениям.

Для предприятий, работающих по сезонному графику, допускается замена используемых в расчетах значений максимальной расчетной скорости ветра  $u_{м.р}$ , значение которой в данной местности в среднем многолетнем режиме превышает в 5 % случаев (подп. 5.11 и 8.1), на значения  $u_{м.р}$ , определенные отдельно для холодного ( $u_{м.р.х}$ ) или теплого ( $u_{м.р.т}$ ) сезонов года (допускается также использование единого за год значения  $u_{м.р}$ ). В тех случаях, когда отсутствует информация для рассматриваемой территории о значении максимальной расчетной скорости ветра  $u_{м.р}$ , допускается ее определение по формулам (2а), (2б)

$$u_{м.р} = 3,936 \cdot u_{г} - 0,344 \cdot u_{г}^2 \text{ при } u_{г} < 4, \quad (2а)$$

$$u_{м.р} = 2,56 \cdot u_{г} \text{ при } u_{г} \leq 4, \quad (2б)$$

где  $u_{г}$  – средняя многолетняя скорость ветра для этой территории, м/с. Формулы (2а), (2б) могут также применяться для определения значений  $u_{м.р}$  отдельно для холодного ( $u_{м.р.х}$ ) и теплого ( $u_{м.р.т}$ ) сезонов года с использованием вместо  $u_{г}$  значений средних многолетних скоростей ветра для холодного ( $u_{г.х}$ ) и теплого ( $u_{г.т}$ ) сезонов соответственно. Если определенные по данным метеонаблюдений или по формулам (2а), (2б) величины  $u_{м.р}$ ,  $u_{м.р.х}$  или  $u_{м.р.т}$  принимают значения менее 6 м/с, то в расчетах по формулам, приведенным в п. 5 – 9 настоящей главы, вместо них следует использовать значение 6 м/с. Величины, определенные по формулам (2а), (2б), не могут использоваться для корректировки соответствующих значений, определенных по данным измерений.

## **5. Метод расчета максимальных разовых концентраций от выбросов одиночного точечного источника [1]**

5.1. Данный метод используется при расчетах рассеивания выбросов от дымовых труб, вентиляционных шахт, а также от источников организованного выброса загрязняющих атмосферный воздух веществ

из установленных отверстий (далее – от точечных источников выброса) при условии, что скорость  $w_0$  выхода газовой смеси (далее – ГВС) из устья источника выброса не превосходит скорости звука в атмосферном воздухе (в данных Методах принимается равной 330 м/с), а температура  $T_r$  ГВС не превышает 3000 °С. В случаях несоблюдения этих условий расчет производится на основе п. 12 настоящей главы.

5.2. Максимальная приземная разовая концентрация ЗВ  $c_m$ , мг/м<sup>3</sup>, при выбросе ГВС из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при опасной скорости ветра  $u_m$  на расстоянии  $x_m$  от источника выброса и определяется по формуле (3):

$$c_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot t \cdot n \cdot \eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе;

$M$  – масса ЗВ, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени (мощность выброса), г/с;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ (газообразных и аэрозолей, включая твердые частицы) в атмосферном воздухе;

$t$  и  $n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, определяемый в соответствии с п. 7 настоящей главы;

$H$  – высота источника выброса, м;

$V_1$  – расход ГВС, определяемый по формуле (4), м<sup>3</sup>/с;

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой ГВС  $T_r$  и температурой атмосферного воздуха  $T_b$ , °С.

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} w_0, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;

$w_0$  – средняя скорость выхода ГВС из устья источника выброса, м/с.

5.3. Значения коэффициента  $A$ , соответствующего неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых разовые концентрации ЗВ в атмосферном воздухе достигают максимальных значений, даны в прил. 2.

5.4. Мощности  $M$  выброса, высоты источников  $H$ , диаметры устьев  $D$ , температуры  $T_r$  и расходы  $V_1$  ГВС при проектировании предприятий должны определяться расчетом в технологической части проекта (для проектируемых, вводимых в эксплуатацию построенных и реконструированных объектов), а для действующих производств – по результатам инвентаризации стационарных источников выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

При расчете максимальных разовых концентраций принимаются сочетания при времени осреднения 20 – 30 мин значений  $M$  и  $V_1$ , реально возможные в течение года при безаварийных условиях эксплуатации предприятия, при которых достигается максимальная концентрация  $c_m$  ЗВ.

Способ определения зависимости мощности выброса  $M$  от скорости ветра определяется методикой расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками выброса. При этом учет зависимости мощности выброса  $M$  от скорости ветра осуществляется с помощью соответствующего множителя, который включается в формулу (20), а максимальная приземная концентрация ЗВ и опасная скорость ветра определяются прямым перебором скоростей. При расчете среднегодовых концентраций аналогичный множитель включается в формулу (117).

В случае, если в методике расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ отсутствует способ определения зависимости мощности выброса  $M$  от скорости ветра, мощность выброса задается постоянным значением, которое при расчете максимальных концентраций принимается согласно требованиям данного пункта, а при расчете среднегодовых концентраций – согласно требованиям подп. 10.1.4.2.

5.5. При определении величины  $\Delta T$  для предприятий, работающих по сезонному графику, допускается принимать значения расчетной температуры окружающего атмосферного воздуха  $T_v$  равными средним месячным температурам воздуха за самый холодный месяц по [2].

Для остальных источников выбросов расчетная температура  $T_v$  принимается равной средней максимальной температуре воздуха наиболее теплого месяца года по [2].

5.6. Значение безразмерного коэффициента  $F$  приведено в прил. 2.

5.7. Коэффициенты  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от характеризующих свойства источника выброса параметров  $v_m$ ,  $v'_m$ ,  $f$  и  $f_e$ :

$$v_M = 0,65 \sqrt{\frac{V_1 \Delta T}{H}}, \quad (5)$$

$$v'_M = 1,3 \frac{w_0 D}{H}, \quad (6)$$

$$f = 1000 \frac{w_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad (7)$$

$$f_e = 800 (v'_M)^3. \quad (8)$$

Коэффициент  $m$  рассчитывается по формулам (9а) – (9б):

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \text{ при } f < 100, \quad (9а)$$

$$m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}} \text{ при } f \geq 100. \quad (9б)$$

Для  $f_e < f < 100$  коэффициент  $m$  вычисляется при  $f = f_e$ .

Коэффициент  $n$  при  $f < 100$  определяется по формулам (10а) – (10в):

$$n = 4,4 \cdot v_M, \text{ при } v_M < 0,5, \quad (10а)$$

$$n = 0,532 \cdot v_M^2 - 2,13 \cdot v_M + 3,13, \text{ при } 0,5 \leq v_M < 2, \quad (10б)$$

$$n = 1 \text{ при } v_M \geq 2. \quad (10в)$$

При  $f \geq 100$  или  $0 \leq \Delta T < 0,5$  коэффициент  $n$  вычисляется согласно следующему пункту.

5.8. Для  $f \geq 100$  (или  $0 \leq \Delta T < 0,5$ ) и  $v'_M \geq 0,5$  (холодные выбросы) при расчете  $c_M$  вместо формулы (3) используется формула (11)

$$c_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot \eta}{H^{4/3}} K, \quad (11)$$

где

$$K = \frac{D}{8 \cdot V_1} = \frac{1}{7,1 \sqrt{w_0 V_1}}, \quad (12)$$

причем  $n$  определяется по формулам (10а – 10в) при  $v_M = v'_M$ .

Аналогично при  $f < 100$  и  $v_M < 0,5$  или  $f \geq 100$  и  $v'_M < 0,5$  (случай предельно малых опасных скоростей ветра) расчет  $c_M$  выполняется по формуле (13)

$$c_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m' \cdot \eta}{H^{7/3}}, \quad (13)$$

где

$$m' = 2,86 \cdot m, \text{ при } v_m < 0,5, \quad (14a)$$

$$m' = 0,9, \text{ при } f \geq 100, v'_m < 0,5. \quad (14б)$$

Формула (13) при  $m' = 0,9$  применяется также при расчете концентраций ЗВ для источников выбросов, у которых вертикальная составляющая скорости поступающей в атмосферу газовой смеси не превышает 0,01 м/с, а давление в ней, ее плотность и температура отличаются от соответствующих характеристик атмосферного воздуха не более чем на 0,01% (далее – источник выбросов фиксированной высоты)  $H$  при  $0 \leq v'_m < 0,5$  и  $-0,5 \leq \Delta T \leq 0$ . Формулы (11) и (13) являются предельными случаями общей формулы (3).

5.9. Расстояние  $x_m$  от источника выброса, на котором приземная концентрация с ЗВ при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $c_m$ , определяется по формуле (15)

$$x_m = \frac{5 - F}{4} dH, \quad (15)$$

Безразмерный коэффициент  $d$  при  $f < 100$  находится по формулам (16а) – 16в):

$$d = 2,48(1 + 0,28^3 \sqrt{f_e}) \text{ при } v_m \leq 0,5, \quad (16a)$$

$$d = 4,95 \cdot v_m(1 + 0,28^3 \sqrt{f}) \text{ при } 0,5 < v_m \leq 2, \quad (16б)$$

$$d = 7\sqrt{v_m}(1 + 0,28^3 \sqrt{f}) \text{ при } v_m > 2. \quad (16в)$$

При  $f \geq 100$  или  $0 \leq \Delta T < 0,5$  коэффициент  $d$  находится по формулам (17а) – (17в):

$$d = 5,7 \text{ при } v'_m \leq 0,5, \quad (17a)$$

$$d = 11,4 \cdot v'_m \text{ при } 0,5 < v'_m \leq 2, \quad (17б)$$

$$d = 16\sqrt{v'_m} \text{ при } v'_m > 2. \quad (17в)$$

Для источника выброса фиксированной высоты  $H$  при  $0 \leq v'_m < 0,5$  и  $-0,5 \leq \Delta T \leq 0$  значение  $x_m$  принимается равным  $5,7 \cdot H$ .

5.10. Опасная скорость ветра  $u_m$  на стандартном уровне флюгера (10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшая приземная концентрация ЗВ  $c_m$ , в случае  $f < 100$  определяется по формулам (18а – 18в):

$$u_m = 0,5 \text{ при } v_m \leq 0,5, \quad (18a)$$

$$u_m = v_m \text{ при } 0,5 < v_m \leq 2, \quad (18б)$$

$$u_m = v_m(1 + 0,12\sqrt{f}) \text{ при } v_m > 2. \quad (18в)$$

При  $f \geq 100$  или  $0 \leq \Delta T < 0,5$  значение  $u_m$  вычисляется по формулам (19а – 19в):

$$u_m = 0,5 \text{ при } v'_m \leq 0,5, \quad (19a)$$

$$u_m = v'_m \text{ при } 0,5 < v'_m \leq 2, \quad (19б)$$

$$u_m = 2,2 \cdot v'_m \text{ при } v'_m > 2. \quad (19в)$$

Для источника выброса фиксированной высоты  $H$  при  $0 \leq v'_m < 0,5$  и  $-0,5 \leq \Delta T \leq 0$  принимается  $u_m = 0,5$  м/с.

5.11. Максимальная приземная концентрация ЗВ  $c_{m,u}$  при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра  $u$ , отличающейся от опасной скорости ветра  $u_m$ , рассчитывается по формуле (20)

$$c_{m,u} = r \cdot c_m, \quad (20)$$

где  $r$  – безразмерная величина, определяемая по формулам (21а – 21б):

$$r = 0,67 \frac{u}{u_m} + 1,67 \left( \frac{u}{u_m} \right)^2 - 1,34 \left( \frac{u}{u_m} \right)^3 \text{ при } \frac{u}{u_m} \leq 1, \quad (21a)$$

$$r = \frac{3 \frac{u}{u_m}}{2 \left( \frac{u}{u_m} \right)^2} - \frac{u}{u_m} + 2 \text{ при } \frac{u}{u_m} > 1. \quad (21б)$$

При проведении расчетов следует использовать значения скорости ветра  $u$  в диапазоне от 0,5 м/с до  $u_{m,p}$  – максимальная расчетная скорость ветра, значение которой в данной местности в среднем многолетнем режиме превышает в 5 % случаев.

5.12. Расстояние от источника выброса  $x_{m,u}$ , на котором при скорости ветра  $u$  и неблагоприятных метеорологических условиях достигается максимальная приземная концентрация  $c_{m,u}$  ЗВ, вычисляется по формуле (22)

$$x_{m,u} = p \cdot x_m, \quad (22)$$

где  $p$  – безразмерный коэффициент, определяемый по формулам (23а – 23в):

$$p = 3 \text{ при } \frac{u}{u_m} \leq 0,025, \quad (23a)$$

$$p = 8,43 \left( 1 - \frac{u}{u_m} \right)^5 + 1 \text{ при } 0,25 < \frac{u}{u_m} \leq 1, \quad (23б)$$

$$p = 0,32 \frac{u}{u_m} + 0,68 \text{ при } \frac{u}{u_m} > 1. \quad (23в)$$

5.13. При опасной скорости ветра  $u_m$  приземная концентрация ЗВ  $c$  в атмосферном воздухе на оси факела от точечного источника, определяемой как геометрическое место точек в пространстве, которые на

каждом заданном расстоянии от источника соответствуют максимальному значению концентрации ЗВ, а также как их проекция на подстилающую поверхность (т. е. на взаимодействующую с атмосферой поверхности земли, в том числе почву, поверхностные воды, снежный и растительный покров), на различных расстояниях  $x$  от источника выброса вычисляются по формуле (24)

$$c = s_1 \cdot c_M, \quad (24)$$

где  $s_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $x/x_M$  и коэффициента  $F$  по формулам (25а – 25е):

$$s_1 = 3 \left( \frac{x}{x_M} \right)^4 - 8 \left( \frac{x}{x_M} \right)^3 + 6 \left( \frac{x}{x_M} \right)^2 \quad (25а)$$

при  $x/x_M \leq 1$ ,

$$s_1 = \frac{1,13}{0,13(x/x_M)^2 + 1} \quad (25б)$$

при  $1 < x/x_M \leq 8$ ,

$$s_1 = \frac{x/x_M}{3,556(x/x_M)^2 - 35,2(x/x_M) + 120} \quad (25в)$$

при  $8 < x/x_M \leq 100$ , и  $F \leq 1,5$ ,

$$s_1 = \frac{1}{0,1(x/x_M)^2 + 2,456(x/x_M) - 17,8} \quad (25г)$$

при  $8 < x/x_M \leq 100$ , и  $F > 1,5$ ,

$$s_1 = 144,3(x/x_M)^{-7/3} \quad (25д)$$

при  $x/x_M > 100$ , и  $F \leq 1,5$ ,

$$s_1 = 37,76 \left( \frac{x}{x_M} \right)^{-7/3} \quad (25е)$$

при  $x/x_M > 100$ , и  $F > 1,5$ .

Для наземных и низких источников выброса (высотой  $H$  не более 10 м) при  $x/x_M < 1$  величина  $s_1$  в формуле (24) заменяется на величину  $s_1^H$ , определяемую по формуле (26):

$$s_1^H = 0,125(10 - H) + 0,125(H - 2)s_1 \quad \text{при } 2 \leq H < 10. \quad (26)$$

Аналогично определяется концентрация загрязняющих веществ на различных расстояниях по оси факела при неблагоприятных метеорологических условиях и других скоростях ветра  $u \neq u_M$ . Сначала по формулам (20) и (22) находятся величины  $c_{M,u}$  и  $x_{M,u}$  соответственно.

Затем в зависимости от отношения  $x/x_m$  рассчитывается значение  $s_1$  по формулам (25а) – (25е) и (26). Искомая концентрация  $c$  ЗВ определяется путем умножения  $c_{m,u}$  на  $s_1$ .

5.14. Приземная концентрация ЗВ в атмосферном воздухе  $c_y$  на расстоянии  $y$  по нормали к оси факела выброса вычисляется по формуле (27)

$$c_y = s_2 \cdot c, \quad (27)$$

где  $s_2$  – безразмерный коэффициент, определяемый по формуле (28):

$$s_2 = \frac{1}{(1 + 5 \cdot t_y + 12,8 \cdot t_y^2 + 17 \cdot t_y^3 + 45,1 \cdot t_y^4)^2}, \quad (28)$$

где

$$t_y = \frac{uy^2}{x^2} \quad (29a)$$

при  $u \leq 5$  м/с,

$$t_y = \frac{5 \cdot y^2}{x^2} \quad (29б)$$

при  $u > 5$  м/с.

5.15. Расчеты распределения максимальных разовых концентраций  $c_z$  ЗВ на разных высотах  $z > 2$  м над подстилающей поверхностью проводятся для таких расчетных точек, на которых на значения концентрации не влияют ветровые тени близлежащих зданий и сооружений (п. 9 настоящей главы). В частности, такие расчеты выполняются при выборе положения устьев воздухозаборных труб и шахт и других объектов, расположенных на открытых участках местности или на участках, где максимальная высота зданий (сооружений) не менее чем в 2,5 раза ниже высоты воздухозабора при условии, что источники выбросов не располагаются в зоне затишья и/или нарушенного ветрового потока, образующейся на подветренной стороне здания (сооружения) (зона подветренной тени), с наветренной стороны (зона наветренной тени, или зона подпора), на крыше (зона крышной тени) или между зданиями (зона межкорпусной тени) (далее – ветровая тень зданий и сооружений). В остальных случаях расчет проводится в соответствии с положениями п. 9 настоящей главы.

Для одиночного источника выброса высотой  $H$  концентрации  $c_z$  ЗВ рассчитываются по формуле (30)

$$c_z = 0,5(c'_1 + c'_2), \quad (30)$$

где  $c'_1, c'_2$  – вычисляемые по формулам при  $x > 0$  приземные концентрации ЗВ от точечных источников выбросов, высоты которых равны  $H_1 = |H - z + 2|$  и  $H_2 = H + z - 2$  соответственно. Остальные параметры выброса рассматриваемого источника выброса ( $M, D, w_0, T_r$ ) сохраняются неизменными.

При  $H < 2$  или при  $H_1 < 2$  в (30) соответственно принимается  $H = 2$  или  $H_1 = 2$ . Аналогично при  $z < 2$  принимается  $z = 2$ .

Расчеты по формуле (30) проводятся на расстояниях  $x$  от точечного источника выброса, удовлетворяющих условию  $x > 10D$ , где  $D$  – диаметр устья источника выброса. При проведении расчетов используются значения скорости ветра  $u$  в диапазоне от 0,5 м/с до  $u_{м.р}$  – максимальная расчетная скорость ветра.

5.16. Расчеты рассеивания выбросов для источников выбросов с прямоугольными устьями (шахт) проводятся по формулам при значениях  $D = D_э$  и  $V_1 = V_{1э}$  и принятии  $w_0$  как средней скорости выхода ГВС в атмосферный воздух.

Средняя скорость  $w_0$  выхода ГВС в атмосферный воздух определяется по формуле (31)

$$w_0 = \frac{V_1}{L_{уст}b} \quad (31)$$

где  $L_{уст}$  – длина устья, м;

$b$  – ширина устья, м.

Эффективный диаметр устья  $D_э$ , м, рассчитывается по формуле (32)

$$D_э = \frac{2 \cdot L_{уст}b}{L_{уст} + b} \quad (32)$$

Для источника выброса с квадратным устьем ( $L_{уст} = b$ ) эффективный диаметр  $D_э$  равняется длине стороны квадрата.

Эффективный расход выходящей в атмосферный воздух в единицу времени ГВС  $V_{1э}$ , м<sup>3</sup>/с, определяется по формуле (33)

$$V_{1э} = \frac{\pi D_э^2}{4} w_0 \quad (33)$$

В остальном расчет рассеивания выбросов производится так же, как для выбросов из источников выброса с круглым устьем.

5.17. Для каждого источника выброса радиус зоны влияния рассчитывается как наибольшее из двух расстояний от источника выброса  $x_1$  и  $x_2$ , где  $x_1 = 10 \cdot x_m$ , а величина  $x_2$  определяется как расстояние от источника выброса, начиная с которого  $c \leq 0,05 \cdot \text{ПДК}_{\text{м.р}}$ .

## 6. Метод расчета рассеивания выбросов ЗВ из аэрационного фонаря в атмосферном воздухе [1]

6.1. Рассеивание выбросов от аэрационного фонаря длиной  $L_{\text{а.ф}}$  (рис. 6 прил. 7) производственного корпуса рассчитывается в соответствии с подп. 8.5.

Для аэрационного фонаря, как и для источника, выбрасывающего загрязняющие атмосферу вещества по установленной линии (далее – линейный источник выброса), наибольшая концентрация ЗВ  $c_m$  достигается при ветре вдоль источника выброса на расстоянии  $x_m$  от проекции его центра на земную поверхность. При указанном направлении ветра значения  $c_m$  и  $x_m$  определяются по формулам (34), (35), (36):

$$c_m = s_3 c'_m, \quad (34)$$

$$x_m = \frac{L_{\text{а.ф}}}{2} + s_4 x'_m, \quad (35)$$

$$u_m = u'_m. \quad (36)$$

Значения  $c'_m$ ,  $x'_m$  и соответствующая  $c'_m$  опасная скорость ветра  $u'_m$  рассчитываются так же, как  $c_m$ ,  $x_m$  и  $u_m$  для одиночного источника выброса с круглым устьем при значениях  $D = D_{\text{э}}$ ,  $V_1 = V_{1\text{э}}$  и мощности  $M$ , равной полной мощности выброса ЗВ из аэрационного фонаря. Эффективный диаметр  $D_{\text{э}}$  вычисляется по формуле (37)

$$D_{\text{э}} = \frac{2L_{\text{а.ф}}V_1}{L_{\text{а.ф}}^2 w_0 + V_1}, \quad (37)$$

где  $V_1$  – расход выбрасываемой ГВС из аэрационного фонаря в единицу времени,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$w_0$  – средняя скорость выхода ГВС из аэрационного фонаря,  $\text{м}/\text{с}$ .

Значения  $V_1$  и  $w_0$ , а также температуры  $T_r$  ГВС определяются экспериментальным путем или по расчету аэрации.

Величина  $V_{1\text{э}}$  вычисляется по формуле (33) с использованием рассчитанного по формуле (37) значения  $D_{\text{э}}$ .

Безразмерные коэффициенты  $s_3$  и  $s_4$  в формулах (34), (35) определяются в зависимости от отношения  $L_{\text{а.ф}}/x'_m$  по формулам (38), (39):

$$s_3 = \frac{1 + 0,45(L_{a.ф}/x'_M)}{1 + 0,45(L_{a.ф}/x'_M) + 0,1(L_{a.ф}/x'_M)^2}, \quad (38)$$

$$s_4 = \frac{1}{1 + 0,6(L_{a.ф}/x'_M)}. \quad (39)$$

За высоту источника выброса  $H$  принимается высота над уровнем земли верхней кромки ветроотбойных щитов аэрационного фонаря или его верхней кромки при отсутствии ветроотбойных щитов.

6.2. В случае, когда производственные процессы в оборудованных аэрационными фонарями корпусах связаны с электролизом, плавкой и термическим переделом металлов, то при расчетах рассеивания выбросов ЗВ из аэрационных фонарей в атмосферном воздухе допускается принимать  $\Delta T = \Delta T' = \text{const}$ .

Значение  $\Delta T'$  определяется на основе расчета теплового баланса корпуса с учетом аэрации.

При этом в исходных данных для расчетов рассеивания выбросов следует использовать температуру ГВС на выходе из аэрационного фонаря, определенную по формуле (40):

$$T_r = T_b + \Delta T', \quad (40)$$

где  $T_b$  определяется обычным образом в соответствии с подп. 5.5.

6.3. Расчеты рассеивания выбросов загрязняющих веществ из аэрационных фонарей в атмосферном воздухе по формулам, приведенным в настоящей главе, проводятся для расстояний от производственного корпуса, больших  $x'_M$ . Для расстояний, меньших  $x'_M$ , необходимо учитывать влияние зданий, оборудованных аэрационными фонарями, в соответствии с формулами, приведенными в п. 9 настоящей главы.

6.4. Расчет рассеивания выбросов ЗВ из аэрационного фонаря в атмосферном воздухе с перебором различных сочетаний скорости и направления ветра проводится в соответствии с формулами, приведенными в п. 5 настоящей главы. При этих расчетах используются значения параметров выброса  $M$ ,  $H$ ,  $D = D_э$  и  $V_1 = V_{1э}$ , рассчитанные в соответствии с подп. 6.1.

## 7. Учет влияния рельефа местности при расчете рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе [1]

7.1. Влияние рельефа местности на максимальную приземную концентрацию  $c_m$  ЗВ от одиночного точечного источника выброса учитывается безразмерным коэффициентом  $\eta$  в формулах (3), (11), (13). В случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ .

7.2. Если перепад высот превышает 50 м на 1 км, то коэффициент  $\eta$  устанавливается на основе анализа картографического материала, характеризующего рельеф местности в окрестности радиусом  $R = 50 \cdot H_m$ , где  $H_m$  – высота наиболее высокого из источников выбросов, расположенных на одном или нескольких земельных участках, в пределах которых расположен конкретный объект, оказывающий негативное воздействие на окружающую среду (далее – промплощадка). При этом  $R$  не должно быть менее 2 км.

Картографический материал должен представлять собой топографические карты масштабом 1:25 000 или 1:10 000 с линиями равных высот местности (изогипсами) и отметками высот, а также с указанием расположения промплощадки предприятия и источников выбросов. При этом используются топографические карты как на бумажных, так и электронных носителях, в том числе полученные из открытых источников в информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

7.3. Если в окрестности расположения рассматриваемого источника выброса можно выделить отдельные формы рельефа (гряды, гребень, ложбину, уступ), то поправочный коэффициент на рельеф  $\eta$  определяется по формуле (41)

$$\eta = 1 + \varphi_1(\eta_m - 1), \quad (41)$$

где  $\varphi_1$  – функция, определяемая по табл. 1 прил. 3, в зависимости от отношения  $x_0/a_0$  для форм рельефа, сечения которых представлены на рис. 2 прил. 7. Если источник выброса расположен на верхнем плато уступа, то функция  $\varphi_1$  определяется в зависимости от отношения «минус  $x_0/a_0$ »;

$x_0$  – расстояние от середины рассматриваемой формы рельефа в случае гряды или ложбины и от верхней кромки склона в случае уступа до источника выброса, как указано на рис. 2 прил. 7;

$a_0$  – полуширина гряды, холма, ложбины или протяженность бокового склона уступа, м;

$\eta_m$  – функция, определяемая по табл. 2 прил. 3 в зависимости от различных форм рельефа и безразмерных величин  $n_1$  и  $n_2$ .

Безразмерная величина  $n_1$  определяется с точностью до десятых по формуле (42)

$$n_1 = \frac{H}{h_0}, \quad (42)$$

где  $H$  – высота источника выброса, м;

$h_0$  – высота (глубина) формы рельефа, м (см. рис. 2 прил. 7).

Безразмерная величина  $n_2$  определяется с точностью до целых по формуле (43)

$$n_2 = \frac{a_0}{h_0}. \quad (43)$$

При  $\eta < 1,03$  в расчетах принимается значение  $\eta$ , равное единице.

Если рассматриваемые формы рельефа представляют собой гряды (ложбины), вытянутые в одном направлении, значения  $h_0$  и  $a_0$  определяются для поперечного сечения, перпендикулярного данному направлению. Если рассматриваемая форма рельефа представляет собой отдельный холм (впадину), то  $h_0$  выбирается соответствующим разнице между максимальной (минимальной) отметкой этого холма (впадины) и отметкой местности, соответствующей началу склона, а  $n_2$  – максимальной крутизне склона, обращенного к источнику выброса.

Для источников выбросов, расположенных в зоне влияния нескольких отдельных форм рельефа, значения  $\eta$  определяются для каждой формы рельефа и используется максимальное из них.

7.4. Расчет распределения приземных концентраций загрязняющих веществ на оси факела на различных расстояниях от источника выброса осуществляется по формуле (24) для расстояний  $x$  от источника выброса, удовлетворяющих неравенству (44):

$$x < l_p x_{\text{м.ров}}, \quad (44)$$

где  $l_p$  – коэффициент, определяемый в зависимости от  $\eta$  по формулам (45а), (45б);

$x_{\text{м.ров}}$  – расстояние  $x_m$  для рассматриваемого источника выброса в условиях ровной или слабопересеченной местности, т. е. при  $\eta = 1$ .

$$l_p = 2,774 \sqrt{\frac{\eta - 1}{1 - \eta^{-7,692}}} \text{ при } \eta \leq 3,053, \quad (45а)$$

$$l_p = 3,974 + 0,316\sqrt{\eta - 3,053} \text{ при } \eta > 3,053. \quad (456)$$

При этом в формулах (25) и (26)  $x_m$  рассчитывается по формуле (46)

$$x_m = k_p \cdot x_{m,ров}, \quad (46)$$

где коэффициент  $k_p$  определяется в зависимости от  $\eta$  и  $F$  по формулам (47а) – (47в):

$$k_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \eta - \eta^{-7,692}}} \text{ при } \eta \leq 3,053, \quad (47а)$$

$$k_p = \frac{8,065 \cdot l_p}{k'_p} \text{ при } \eta > 3,053 \text{ и } F \leq 1,5, \quad (47б)$$

$$k_p = \frac{0,226 \cdot l_p}{\sqrt{0,059 \cdot l_p^2 \cdot \eta + 0,452 \cdot \eta + 16,794} - 2,775} \quad (47в)$$

при  $\eta > 3,053$  и  $F > 1,5$ .

Коэффициент  $k'_p$  в формуле (47б) имеет вид

$$k'_p = 0,13 \cdot l_p^2 \cdot \eta + \eta + 39,776 + \sqrt{0,0169 \cdot l_p^4 \cdot \eta^2 + 0,26 \cdot l_p^2 \cdot \eta^2 + \eta^2 + 10,342 \cdot l_p^2 \cdot \eta + 79,552 \cdot \eta - 597,35} \quad (47г)$$

Если условие формулы (44) не выполняется, то распределение приземных концентраций по оси факела на различных расстояниях от источника выброса рассчитывается по формулам, приведенным в гл. 5, при значении  $\eta = 1$ .

7.5. Если источник выброса располагается в долине шириной  $L_{дол}$  и его высота  $H$  меньше  $2/3$  глубины долины, то расчеты по формуле (24) для направления ветра вдоль долины производятся до расстояний  $x$ , удовлетворяющих условию (48):

$$x = L_{дол} \sqrt{u}. \quad (48)$$

Для расстояний, превышающих  $x$ , функция  $s_1$  умножается на величину  $\sqrt{\frac{x}{L_{дол} \sqrt{u}}}$ .

При других значениях скоростей ветра  $u \neq u_m$  расчет проводится аналогичным образом, причем вместо  $x_{m,ров}$  в формулах (44) и (46) используется значение  $x_{m.u,ров}$  величины  $x_{m.u}$ , определенной в соответствии с подп. 5.12 для условий ровной или слабопересеченной местности.

7.6. Рассеивание выбросов на промплощадке с учетом влияния рельефа местности вычисляется в соответствии с положениями п. 9 настоящей главы. При этом значения  $c_m$  и  $x_m$  определяются в соответствии с подп. 7.2 – 7.5, а безразмерный коэффициент  $s_1$  – с учетом указаний, изложенных в подп. 7.4 – 7.5.

## **8. Метод расчета максимальных разовых концентраций ЗВ в атмосферном воздухе выбросами групп точечных, линейных и площадных источников выбросов [1]**

8.1. Приземная концентрация ЗВ  $c$  в фиксированной точке местности при наличии группы источников выбросов определяется как сумма концентраций данного вещества от отдельных источников выброса при заданных направлении и скорости ветра

$$c = c_1 + c_2 + \dots + c_N, \quad (49)$$

где  $c_1, c_2, \dots, c_N$  – концентрации ЗВ соответственно от первого, второго, ...,  $N$ -го источников выбросов, расположенных с наветренной стороны при рассматриваемом направлении ветра.

Максимальная разовая концентрация ЗВ  $c_m$  в фиксированной точке местности при наличии группы источников выбросов определяется как максимальное значение концентраций ЗВ, рассчитанных в этой точке при различных сочетаниях скоростей и направлений ветра. При этом скорости ветра варьируются в диапазоне от 0,5 м/с до своего максимального расчетного значения  $u_{m,p}$  (определяется согласно подп. 5.11).

Учет влияния рельефа местности и совокупности зданий, строений и сооружений на рассматриваемой территории (далее – застройка) при необходимости осуществляется в соответствии с пп. 7 и 9 настоящей главы.

В случаях, когда известно, что имеются неучтенные источники выброса того же вещества, в правой части формулы (49) добавляется слагаемое  $c'_ф$ , характеризующее фоновое загрязнение атмосферного воздуха от неучтенных источников выброса. Расчет  $c'_ф$  проводится в соответствии с п. 9.

При установлении неблагоприятных условий выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух и подготовке исходных данных для расчета концентраций ЗВ должна учитываться нестационарность мощностей и других параметров выброса источников выбросов и их

совокупностей (в течение суток, года, технологических циклов). Как и для одиночного источника выброса, при расчетах приземных концентраций ЗВ выбросами группы источников принимается наиболее неблагоприятное сочетание значений  $M_i$  и  $V_{1i}$ , реально осуществляющееся для всех рассматриваемых источников выброса одновременно.

В целях ускорения и упрощения расчетов допускается сократить количество рассматриваемых источников выброса путем их объединения (особенно мелких источников) в отдельные виртуальные источники выбросов, т. е. во вспомогательные источники выброса или совокупность вспомогательных источников выбросов, которые вводятся для расчета характеристик распространения ЗВ от рассматриваемого источника выброса (как указано в подп. 8.8).

8.2. Максимальная суммарная концентрация  $c_m$  ЗВ от  $N$  расположенных близко одиночных точечных источников выбросов, имеющих одинаковые значения высоты, диаметра устья, скорости выхода в атмосферный воздух и температуры ГВС, вычисляется по формуле (50)

$$c_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot t \cdot n \cdot \eta}{H^2} \sqrt[3]{\frac{N}{V\Delta T}}, \quad (50)$$

где  $M$  – суммарная мощность выброса ЗВ из  $N$  рассматриваемых источников выброса, г/с;

$V$  – определяемый по формуле (51) суммарный расход выбрасываемой всеми источниками ГВС, м<sup>3</sup>/с.

$$V = V_1 N. \quad (51)$$

Формула (5) преобразуется к виду (52)

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V\Delta T}{NH}}. \quad (52)$$

В остальном схема расчета концентраций загрязняющих веществ, обусловленных выбросами от группы близко расположенных одинаковых точечных источников выброса, не отличается от приведенной в п. 5 настоящей главы схемы расчета для одиночного источника выброса.

При расчетах концентраций ЗВ на промплощадке и за ее пределами источники выброса могут рассматриваться как близко расположенные, если максимальное расстояние между ними не превосходит соответственно  $L_{ЗВ}$  или  $0,25 \cdot l_{\min}$ , где  $L_{ЗВ}$  определено в подп. 9.1.5,

а  $l_{\min}$  – минимальное расстояние от центра тяжести точек размещения источников выброса до расчетных точек за пределами промплощадки.

8.3. Для расчета концентраций ЗВ, обусловленных выбросами из близко расположенных одинаковых точечных источников выбросов, когда  $0 \leq \Delta T < 0,5$  или параметр  $f \geq 100$ , мощность  $M$  принимается равной суммарной мощности выброса из всех источников, значение  $V_1$  определяется по формуле (53а)

$$V_1 = \frac{V}{N}, \quad (53а)$$

а формула (12) преобразуется к виду (53б)

$$K = \frac{ND}{8V} = \frac{1}{7,1} \sqrt{\frac{N}{w_0 V}}. \quad (53б)$$

Далее расчет проводится с использованием формул, приведенных в п. 5 настоящей главы, для одиночного источника выброса.

8.4. Максимальная приземная концентрация ЗВ  $c_m$  при выбросах через многоствольную трубу ( $N$  стволов) рассчитывается по формулам (54а) – (54б):

$$c_m = (c'_m - c''_m)d_1 + c''_m \text{ при } l < d_2 H, \quad (54а)$$

$$c_m = c'_m, l < d_2 H, \quad (54б)$$

где  $l$  – среднее расстояние между центрами устьев стволов, определяемое как среднее арифметическое из всех расстояний между парами различных устьев, м;

$d_2$  – безразмерный коэффициент, определяемый по формулам (108а), (108б);

$c'_m$  – максимальная приземная концентрация ЗВ, определяемая по формуле (3) при параметрах выброса для одного ствола и при мощности выброса  $M$ , равной суммарной мощности выброса из всех стволов;

$c''_m$  – максимальная приземная концентрация ЗВ, рассчитываемая по формуле (3) при следующих условиях:

- мощность  $M$  равна суммарной мощности выброса из всех стволов,
- диаметр  $D$  равен эффективному диаметру  $D_э$  источника выброса, который определяется по формуле (55):

$$D_э = D\sqrt{N}, \quad (55)$$

- расход выходящей ГВС  $V_1$  равен эффективному расходу  $V_{1э}$ , вычисленному по формуле (33);

$d_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый по формуле (56):

$$d_1 = \frac{l - D}{d_2 H - D}. \quad (56)$$

В формуле (56)  $D$  – диаметр устья одного ствола.

Расстояние  $x_m$ , на котором достигается максимальная концентрация ЗВ  $c_m$ , вычисляется по формулам (57а) – (57б):

$$x_m = (x'_m - x''_m)d_1 + x''_m \text{ при } l < d_2 H, \quad (57a)$$

$$x_m = x'_m \text{ при } l \geq d_2 H, \quad (57b)$$

где  $x'_m$  – расстояние, соответствующее максимальной концентрации ЗВ  $c'_m$ , определяемое по формуле (15) при параметрах выброса для одного ствола;

$x''_m$  – расстояние, соответствующее максимальной концентрации ЗВ  $c''_m$ , определяемое по формуле (15) с учетом  $D = D_{\text{Э}}$ ,  $V = V_{1\text{Э}}$ .

Опасная скорость ветра  $u_m$  вычисляется по формулам (58а) – (58б):

$$u_m = (u'_m - u''_m)d_1 + u''_m \text{ при } l < d_2 H, \quad (58a)$$

$$u_m = u'_m \text{ при } l \geq d_2 H, \quad (58b)$$

где  $u'_m$  – опасная скорость ветра, соответствующая максимальной концентрации ЗВ  $c'_m$  и рассчитанная по формулам (18) и (19) при параметрах выброса для одного ствола;

$u''_m$  – опасная скорость ветра, соответствующая максимальной концентрации ЗВ  $c''_m$  и определяемая по формулам (18) и (19) с учетом  $D = D_{\text{Э}}$ ,  $V = V_{1\text{Э}}$ .

В остальном расчет проводится как для одиночного источника выброса.

Если многоствольная труба представляет собой трубу, разделенную на секторы, т. е. состоит из стволов секторной формы, то расчеты выполняются так же, как для одноствольной трубы при  $V = V_{1\text{Э}}$  (формула (33)) и  $D = D_{\text{Э}}$

$$D_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi}}, \quad (59)$$

где  $S_c$  – суммарная площадь устьев всех действующих стволов.

В случае, когда температура  $T_r$  и скорость выхода  $w_0$  ГВС для отдельных стволов различаются между собой, для расчетов используются

их средневзвешенные значения, причем веса принимаются равными расходам ГВС для отдельных стволов.

8.5. Концентрация  $c_l$  ЗВ от линейного источника выброса, расположенного вдоль отрезка  $L$  трехмерной кривой, рассчитывается по формуле (60)

$$c_l(x, y, z) = \frac{1}{|L|} \int_L c(x - \xi, y - \eta, z - \zeta) dl, \quad (60)$$

где  $|L|$  – длина указанного отрезка, и интеграл вычисляется вдоль этого отрезка;

$c(x - \xi, y - \eta, z - \zeta)$  – концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке  $(x, y, z)$  точечным источником выброса, расположенным в точке  $(\xi, \eta, \zeta)$  отрезка  $L$ . При этом в расчетных точках, находящихся с наветренной стороны от источника выброса, значение подынтегральной функции в формуле (60) принимается равным нулю.

В частном случае линейного источника выброса, расположенного на подстилающей поверхности,  $c_l$  рассчитывается по формуле (61)

$$c_l(x, y, z) = \frac{1}{|L|} \int_L c(x - \xi, y - \eta, z) dl. \quad (61)$$

Подынтегральные функции в формулах (60) и (61) вычисляются по выражениям, приведенным в пп. 5 – 7 настоящей главы, с использованием суммарного выброса от всего рассматриваемого источника выброса.

В случае выбросов от аэрационного фонаря подынтегральная функция в формулах (60) и (61) рассчитывается с использованием суммарной мощности выброса и эффективного диаметра, определяемого по формуле (37).

Если линейным источником выброса аппроксимируются выбросы от точечного источника мощности  $M(t)$ , который за время осреднения перемещается с положительной скоростью  $v(t)$ , м/с, вдоль отрезка  $L$ , то концентрация  $c_l$  ЗВ находятся по формуле (62)

$$c_l(x, y, z) = \frac{1}{|L|} \int_L \frac{M(l)c'(x - \xi, y - \eta, z - \zeta)}{v(l)} dl, \quad (62)$$

где  $M(l)$  и  $v(l)$  – значения  $M(t)$  и  $v(t)$ , соответствующие тому моменту времени  $t$ , когда перемещающийся источник выброса находится в

точке  $l = (\xi, \eta, \zeta)$ , а  $c'$  – вычисленная по формулам, приведенным выше, концентрация в точке  $(x, y, z)$  от одиночного источника выброса ЗВ единичной мощности, располагающегося в точке  $(\xi, \eta, \zeta)$ .

Подынтегральная функция в формулах (60) – (62) отлична от нуля в точках отрезка  $L$ , координаты которых по оси  $x$  отрицательны в декартовой системе координат с началом в расчетной точке и осью  $x$ , направленной по направлению ветра.

Участки отрезка  $L$ , на которых скорость  $v(l) < 0,01$  м/с, исключаются из области интегрирования в формуле (62) и каждый из них заменяется на точечный источник, мощность выброса которого равна мощности выброса от соответствующего участка.

Для тех участков отрезка  $L$ , на которых скорость  $v(l) < 0$ , направление интегрирования в формуле (62) изменяется на противоположное с одновременным изменением знака скорости.

Погрешность численного интегрирования при расчете концентраций ЗВ от линейного источника выброса по формулам (60) – (62) не должна превышать 3 % во всех расчетных точках.

Для линейного источника, мощность выброса которого изменяется от точки к точке, подынтегральная функция в формулах (60) – (62) умножается на функцию  $G_0(\xi, \eta)$ , описывающую изменчивость мощности выброса вдоль рассматриваемого источника по отношению к ее характерному значению, применяемому при расчете концентрации  $c$  ЗВ.

8.6. Концентрация  $c_s$  ЗВ от источника, выбрасывающего загрязненные вещества в атмосферный воздух с установленной ограниченной поверхности (далее – площадной источник выброса), занимающего область  $S$  площадью  $S_{\text{п}}$ , рассчитывается по формуле (63)

$$c_s(x, y) = \frac{1}{S_{\text{п}}} \iint_S c(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta, \quad (63)$$

где  $c(x - \xi, y - \eta)$  – концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке  $(x, y)$  точечным источником выброса, находящимся в точке  $(\xi, \eta)$  области  $S$ , и интеграл в формуле (63) вычисляется по этой области.

Подынтегральная функция в формуле (63) вычисляется по формулам, приведенным в пп. 5 – 7 настоящей главы, с использованием суммарного выброса от всего площадного источника выброса. При этом в расчетных точках, находящихся с наветренной стороны от источника, ее значение принимается равным нулю.

Для площадного источника, мощность выброса которого изменяется от точки к точке, подынтегральную функцию в формуле (63) следует умножить на функцию  $G_0(\xi, \eta)$ , характеризующую изменение удельной мощности выброса в точках рассматриваемого источника по отношению к характерному значению этой удельной мощности, применяемому при расчете концентрации  $c$  ЗВ в отсутствии учета функции  $G_0(\xi, \eta)$ .

Алгоритмы интегрирования должны обеспечивать вычисление концентраций загрязняющих веществ во всех расчетных точках по формуле (63) с погрешностью не более 3 %.

Допускается вычисление интеграла в формуле (63) путем представления площадного источника в виде совокупности одинаковых точечных источников, если при этом погрешность вычисления интеграла не превышает 3 %.

8.7. Концентрация  $c_V$  ЗВ от расположенного вблизи подстилающей поверхности источника, выбрасывающего ЗВ в установленном ограниченном объеме (далее – объемный источник выброса), занимающего область  $V$  объемом  $|V|$ , рассчитывается по формуле (64)

$$c_V(x, y, z) = \frac{1}{|V|} \iiint_V c(x - \xi, y - \eta, z - \zeta) d\xi d\eta d\zeta, \quad (64)$$

где подынтегральная функция вычисляется по формулам, приведенным в пп. 5 – 8 настоящей главы.

Алгоритмы интегрирования должны обеспечивать вычисление концентраций ЗВ во всех расчетных точках по формуле (64) с погрешностью не более 3 %.

Для объемного источника, мощность выброса которого изменяется от точки к точке, подынтегральная функция в формуле (64) умножается на функцию  $G_0(\xi, \eta, \zeta)$ , описывающую изменение удельной мощности выброса в точках рассматриваемого источника выброса по отношению к ее характерному значению, применяемому при расчете концентрации  $c$  ЗВ.

8.8. С целью сокращения объема вычислений и облегчения анализа их результатов допускается представление совокупности большого числа однотипных источников выбросов, а также рассредоточенных по территории источников неорганизованного выброса как пло-

щадных источников выбросов. Площадными источниками выброса могут аппроксимироваться такие источники, как резервуарные парки предприятий, совокупности мелких бытовых котельных и труб печного отопления в городах, а также группы низких вентиляционных источников выбросов предприятия (при расчетах рассеивания выбросов от указанных источников для участков, расположенных за пределами санитарно-защитной зоны предприятия). Кроме того, площадными источниками могут аппроксимироваться выбросы от автостоянок, мест открытого складирования пылящих материалов или отходов, водоемов, с поверхности которых испаряются вредные вещества, выбросы от автомагистралей.

Группа распределенных по площади точечных источников выброса может быть объединена в площадной источник, если их не менее 20 и расстояние от каждого источника до ближайшего соседнего источника отличается не более чем на 10 % от среднего по всем объединяемым источникам расстояния от каждого из них до четырех ближайших соседних источников. Кроме того, для каждого из объединяемых источников такие параметры выброса, как высота  $H$  и диаметр устья  $D$ , температура  $T_r$  и скорость выхода  $w_0$  газовой смеси из устьев источников выброса, отличаются от их средних значений по объединяемой группе не более чем на 10 %. При выполнении этих условий расчет загрязнения атмосферного воздуха должен осуществляться с использованием средних по объединяемой группе значений параметров выброса. При большем разбросе указанных параметров группа источников выброса представляется несколькими площадными источниками выброса с более близкими значениями этих параметров.

Группа точечных источников выбросов может также объединяться в виртуальный точечный источник с мощностью выброса, равной суммарной мощности этих источников, если такие их параметры выброса, как высота  $H$  и диаметр  $D$  устья, температура  $T_r$  и скорость выхода  $w_0$  ГВС из устьев источников, удовлетворяют приведенному в данном пункте критерию близости, а максимальное расстояние между любыми парами объединяемых источников выброса по крайней мере в 10 раз меньше, чем расстояние от центра масс объединяемых источников до ближайшей к нему расчетной точки, в которой вычисляется концентрация от указанного виртуального источника. При большем разбросе указанных параметров выброса группа источников выбросов

может при необходимости представляться в виде совокупности нескольких виртуальных источников с использованием этого же критерия для каждого виртуального источника.

По примесям, которым соответствует значение безразмерного коэффициента  $F = 1$ , допускается также объединение произвольных точечных источников выброса в единый виртуальный источник при условии, что максимальное расстояние между любыми парами объединяемых источников по крайней мере в 10 раз меньше, чем расстояние от центра масс объединяемых источников выброса до ближайшей к нему расчетной точки. Мощность выброса объединенного источника равна суммарной мощности этих источников, а параметры выброса объединенного источника, такие как высота  $H$  и диаметр  $D$  устья, температура  $T_r$  и скорость выхода  $w_0$  ГВС из устьев источника, приняты их минимальными значениями для источников объединяемой группы.

8.9. Для совокупности источников выбросов отдельных предприятий рассчитываются зоны влияния, включающие в себя круги радиусом  $x_1$ , равным  $10 \cdot x_m$ , проведенные вокруг каждого из основных источников выброса (труб или других источников) предприятия, и участки местности, где рассчитанная по формуле (49) суммарная концентрация ЗВ от всей совокупности источников данного предприятия, включая источники низких и неорганизованных выбросов, превышает  $0,05 \cdot \text{ПДК}_{\text{м.р}}$ .

Зоны влияния должны рассчитываться по каждому загрязняющему веществу (группе ЗВ комбинированного вредного действия) отдельно.

8.10. Размеры расчетной области, общее количество узлов и шаги расчетной сетки должны соответствовать размерам зоны влияния рассматриваемой совокупности источников выбросов. Погрешность вычисленных суммарных концентраций ЗВ в узлах задаваемой регулярной сетки точек, а также в дополнительно заданных промежуточных точках не должна превышать 3 %. При известном точном решении погрешность вычисления суммарных концентраций определяется путем сопоставления результатов вычислений с указанным точным решением. Если точное решение неизвестно, то погрешность устанавливается путем сопоставления результатов вычисления суммарных концентраций с уточненными результатами вычислений. Такие результаты

находятся путем проведения последовательных расчетов этих суммарных концентраций с измельчением на каждом шагу в два раза параметров, определяющих погрешность вычислений (шагов интегрирования, используемых при вычислении интегралов, шагов перебора аргументов, по которым ищется экстремум в выражении для суммарных концентраций). Такое измельчение продолжается до тех пор, пока различие в последовательных значениях суммарных концентраций не станет меньше 0,3 % при значениях суммарной концентрации соответственно более 0,05 ПДК<sub>мр</sub> или 0,05 ПДК<sub>сс</sub>. Для расчетных точек, в которых указанные условия не выполняются, уточненное решение определяется из требования, чтобы различие в последовательных значениях суммарных концентраций было соответственно меньше 0,00015 ПДК<sub>мр</sub> или 0,00015 ПДК<sub>сс</sub>.

## **9. Метод расчета рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе с учетом влияния застройки [1]**

### **9.1. Основные расчетные характеристики.**

9.1.1. Формулы, приведенные в данной главе, предназначены для расчетов приземных концентраций ЗВ в слое от 0 до 2 м включительно и вертикального распределения концентраций загрязняющих веществ (включая расчет концентраций ЗВ у стен и крыш зданий) с учетом влияния застройки.

9.1.2. Для каждого из рассматриваемых источников выбросов перед выполнением расчетов с учетом застройки по формулам, приведенным в п. 5 настоящей главы, определяются максимальная концентрация ЗВ  $c_m$ , а также расстояние  $x_m$  и опасная скорость  $u_m$ , при которых достигается концентрация ЗВ  $c_m$  при отсутствии застройки.

9.1.3. Рассеивание выбросов с учетом влияния застройки рассчитывается в случаях, когда здание удалено от источника выброса на расстояние менее  $x_m$  или когда источник расположен на здании или в зонах возможного образования ветровых теней, как указано в подп. 9.1.5. При этом высота здания  $H_z$  должна быть не менее 0,4 высоты источника выброса ( $H_z \geq 0,4 \cdot H$ ). Если здание удалено от источника на расстояние большее, чем  $0,5 \cdot x_m$ , и основание источника не размещается в зоне возможного образования ветровой тени, то влияние застройки

учитывается в случаях, когда высота здания превышает 0,7 высоты источника выброса ( $H_3 > 0,7 \cdot H$ ).

Не подлежат учету здания и сооружения высотой менее 5 м, а также здания и сооружения, максимальный линейный размер которых по горизонтали не превышает 10 м.

Учет сооружения осуществляется в случае, если коэффициент проицаемости, определяемый согласно [3] и равный отношению суммарной площади имеющихся в нем проемов к полной площади сооружения, ниже 0,5.

9.1.4. Рассматриваемое здание аппроксимируется в виде параллелепипеда (рис. 3 прил.7) высотой  $H_3$ , длиной  $L'_d$  (размер наибольшей стороны основания) и шириной  $L'_ш$ .

Высота  $H_3$  вычисляется по формуле (65)

$$H_3 = \frac{V_3}{S_0}, \quad (65)$$

где  $V_3$  – фактический объем здания, м<sup>3</sup>;

$S_0$  – фактическая площадь основания здания, м.

Значения  $L'_d$  и  $L'_ш$  удовлетворяют условию  $L'_d \cdot L'_ш = S_0$ , а положение боковых сторон аппроксимирующего параллелепипеда выбирается так, чтобы они совпадали или были близки к стенам зданий.

Если здания имеют сложную конфигурацию (рис. 4 прил. 7), они аппроксимируются несколькими параллелепипедами. Приземные концентрации ЗВ рассчитываются согласно подп. 9.5 как для совокупности зданий.

Для зданий, имеющих в плане форму, близкую к правильному многоугольнику или кругу, в качестве основания аппроксимирующего параллелепипеда берется квадрат площадью, равной площади исходного здания.

9.1.5. Для каждого здания при заданном направлении ветра различаются три зоны ветровых теней высотой  $H_в$  над уровнем земли (рис. 5, а прил. 7):

- зона подветренной тени (зона I);
- зона крышной тени (зона II);
- зона наветренной тени, или зона подпора (зона III).

На рис. 5, а прил. 7 штриховкой обозначено сечение здания, проведенное вдоль направления ветра, сплошными линиями обозначены границы зон ветровых теней I, II и III.

Максимальные значения  $H_{\text{вI}}, H_{\text{вII}}, H_{\text{вIII}}$  высот ветровых теней указанных типов и их протяженности  $L_{\text{I}}, L_{\text{II}}, L_{\text{III}}$  вычисляются формулами (66а) – (66г):

$$H_{\text{вI}} = H_3, L_{\text{I}} = 4 \cdot L_{\text{зв}}, \quad (66а)$$

$$H_{\text{вII}} = H_3 + 0,4 \cdot L_{\text{д}}, L_{\text{II}} = L_{\text{д}} \text{ при } L_{\text{д}} \leq 2 \cdot L_{\text{зв}}, \quad (66б)$$

$$H_{\text{вII}} = H_3 + 0,4 \cdot L_{\text{д}}, L_{\text{II}} = 2 \cdot L_{\text{зв}} \text{ при } L_{\text{д}} > 2 \cdot L_{\text{зв}}, \quad (66в)$$

$$H_{\text{вIII}} = 0,5 \cdot L_{\text{зв}}, L_{\text{III}} = L_{\text{зв}}, \quad (66г)$$

где  $H_3$  – высота здания;

$L_{\text{д}}$  – длина здания, устанавливаемая в зависимости от направления ветра;

$L_{\text{зв}}$  – масштаб длины, характеризующий размеры ветровых теней, который вычисляется по формулам (67а) – (67б):

$$L_{\text{зв}} = H_3 \text{ при } H_3 \leq L_{\text{ш}}, \quad (67а)$$

$$L_{\text{зв}} = L_{\text{ш}} \text{ при } H_3 > L_{\text{ш}}. \quad (67б)$$

Если высота ветровых теней  $H_{\text{в}}$  (в зонах I, II, III) окажется менее 1 м, то принимается  $H_{\text{в}} = 1$  м.

Ширина здания  $L_{\text{ш}}$  и его длина  $L_{\text{д}}$  устанавливаются в зависимости от направления ветра. В случаях, когда ветер направлен по нормали к стене здания, длина этой стены принимается за  $L_{\text{ш}}$ , а длина смежной стены – за  $L_{\text{д}}$  (рис. 5, б прил. 7). В остальных случаях  $L_{\text{д}}$  и  $L_{\text{ш}}$  устанавливаются в соответствии с подп. 9.2.3.

Границы ветровых теней по высоте рассчитывается по формулам (68а) – (68в):

$$h_{\text{I}}(x) = H_3 \left[ 1 - \left( \frac{x'}{4 \cdot L_{\text{зв}}} \right)^2 \right] \text{ при } 0 \leq x' \leq L_{\text{I}}, \quad (68а)$$

$$h_{\text{II}}(x) = H_3 + L_{\text{зв}} \cdot 1,6 \frac{x'}{L_{\text{II}}} \left[ 1 - \frac{x'}{L_{\text{II}}} \right] \text{ при } 0 < x' < L_{\text{II}}, \quad (68б)$$

$$h_{\text{III}}(x) = L_{\text{зв}} \frac{1 - x'/L_{\text{зв}}}{2 + x'/L_{\text{зв}}} \text{ при } 0 \leq x' \leq L_{\text{зв}}, \quad (68в)$$

где  $x'$  – расстояние вдоль направления ветра от точки, в которой вычисляется высота ветровой тени, до стены здания.

Если ветровые тени зданий, которые необходимо учесть в расчетах, пересекаются, то образуется объединенная тень, граница которой определяется согласно подп. 9.5.1. Случаи, в которых необходим более детальный учет наложения ветровых теней, рассмотрены в подп. 9.5.

9.1.6. При наличии застройки максимальная приземная концентрация ЗВ  $\hat{c}_m$  вычисляется по формуле (69):

$$\hat{c}_m = c_m \cdot \hat{\eta}_m, \quad (69)$$

где  $c_m$  – максимальная концентрация ЗВ, полученная без учета влияния застройки (согласно подп. 9.1.2);

$\hat{\eta}_m$  – поправка, учитывающая влияние застройки, определяемая по формулам, приведенным в подп. 9.2 и 9.3.

Концентрация  $\hat{c}_m$  ЗВ достигается на расстоянии  $\hat{x}_m$  от источника выброса при опасной скорости ветра  $\hat{u}_m$ .

9.2. Оценка максимальных концентраций загрязняющих веществ от одиночного точечного источника выброса при наличии одного здания.

9.2.1. Формулы настоящего пункта предназначены для приближенной оценки величины  $\hat{c}_m$  при опасных скоростях ветра. В общем случае величины  $\hat{c}_m$ ,  $\hat{x}_m$  и  $\hat{u}_m$  определяются по формулам, приведенным в подп. 9.3, после проведения расчетов на рассматриваемой площадке с перебором скоростей и направлений ветра.

Расчет  $\hat{c}_m$  проводится в зависимости от расположения основания источника выброса (точка 0 на рис. 6 прил. 7) относительно здания следующим образом:

а) при расположении основания источника выброса в зонах возможного образования подветренной тени, обозначенных пунктирными линиями, при ветре, направленном по нормали к стене здания (рис. 6, а прил. 7), определяется в соответствии с подп. 9.2.2;

б) при расположении основания источника выброса в зонах, где ветровые тени образуются только при направлении ветра, отличном от направления нормалей к стенам здания (рис. 6, б прил. 7),  $\hat{c}_m$  определяется согласно подп. 9.2.3.

в) если основание источника выброса располагается вне зон возможного образования ветровой тени на удалении до  $1,5 \cdot L_{зв}$  от их границы  $x_b$  (рис. 6, в, г прил. 7), то расчет  $\hat{c}_m$  ведется согласно подп. 9.2.4;

г) при расположении основания источника выброса на крыше здания расчет  $\hat{c}_m$  проводится согласно подп. 9.2.5;

д) в остальных случаях расчет максимальных концентраций ЗВ осуществляется без учета влияния зданий, т. е.  $\hat{c}_m = c_m$ .

9.2.2. При расположении основания источника выброса в зонах возможного образования ветровых теней при ветре, направленном по нормали к стене здания (см. рис. 6, а прил. 7), максимальная приземная

концентрация ЗВ  $\hat{c}_m$  достигается при направлении ветра, соответствующем переносу атмосферного воздуха по нормали от здания к источнику выброса. В этом случае

$$\hat{\eta}_m = s_1(1 - \zeta_m) + \zeta_m \vartheta_1, \quad (70)$$

где  $s_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый по формулам, приведенным в п. 5 настоящей главы;

$\zeta_m$  – безразмерный коэффициент, описывающий влияние колебаний направления ветра. Значение  $\zeta_m$  вычисляется по формуле (80);

$\vartheta_1$  – безразмерный расчетный коэффициент, который определяется по формулам (71а) – (71б):

$$\vartheta_1 = r_3 \tilde{\eta} s \text{ при } \vartheta_1 > 1, \quad (71a)$$

$$\vartheta_1 = 1 \text{ при } \vartheta_1 < 1, \quad (71b)$$

Расчетные коэффициенты  $r_3$ ,  $\tilde{\eta}$  и  $s$  в формуле (71а) являются безразмерными. Коэффициент  $r_3$  описывает влияние различия в опасной скорости ветра  $\hat{u}_m$  при наличии здания и опасной скорости ветра  $u_m$  при отсутствии здания. Коэффициент  $\tilde{\eta}$  характеризует изменение структуры воздушного потока при наличии застройки. Коэффициент  $s$  характеризует влияние турбулентной диффузии внутри ветровой тени.

Для определения коэффициента  $r_3$  предварительно вычисляется опасная скорость ветра  $\hat{u}_m$  по формулам (18а) – (18в). При этом, если высота источника выброса  $H$  меньше высоты зоны ветровой тени  $H_B$  в точке расположения источника выброса, т. е.  $H < H_B$  (рис. 7, а прил. 7), то входящие в указанные формулы значения  $v_m$  и  $f$  рассчитываются при замене высоты источника выброса  $H$  на высоту зоны ветровой тени  $H_B$ .

Далее  $r_3$  находится в зависимости от соотношения  $\hat{u}_m/u_m$  по формулам (72а) – (72б):

$$r_3 = 0,67 \frac{\hat{u}_m}{u_m} + 1,67 \left( \frac{\hat{u}_m}{u_m} \right)^2 - 1,34 \left( \frac{\hat{u}_m}{u_m} \right)^3 \text{ при } \frac{\hat{u}_m}{u_m} \leq 1, \quad (72a)$$

$$r_3 = \frac{3 \cdot \hat{u}_m/u_m}{2(\hat{u}_m/u_m)^2 - \hat{u}_m/u_m + 2} \text{ при } \frac{\hat{u}_m}{u_m} > 1. \quad (72b)$$

Если  $H > H_B$  (рис. 7, б прил. 7), то  $\hat{u}_m = u_m$  и  $r_3 = 1$ .

Коэффициент  $\tilde{\eta}$  определяется по формулам (73а) – (73б):

$$\tilde{\eta} = 1 + \frac{15}{1 + 16(H/H_B - 1)^2} \text{ при } H \geq H_B, \quad (73a)$$

$$\tilde{\eta} = 16 \text{ при } H < H_B. \quad (73b)$$

Коэффициент  $s$  в формуле (71а) рассчитывается по формулам (74а) – (74г):

$$s = 0,6 \cdot t_1^4 - 2 \cdot t_1^3 + 2 \cdot t_1^2 \quad \text{при } 0 \leq t_1 < 1, \quad (74а)$$

$$s = \frac{62,2}{64 + t_1^2} - \frac{0,357}{t_1} \quad \text{при } 1 \leq t_1 \leq 8, \quad (74б)$$

$$s = \frac{t_1(t_1 - 1) + 14,7}{t_1[1,62 \cdot t_1(t_1 - 1) + 209]} + \frac{0,51(t_1 - 4,92)^2}{t_1(t_1 - 3,63)^2} + \frac{3,04}{t_1} \quad \text{при } 8 < t_1 \leq 40, \quad (74в)$$

$$s = \frac{4,4504 \cdot t_1 - 14,419}{t_1^2} \quad \text{при } t_1 > 40, \quad (74г)$$

в зависимости от аргумента

$$t_1 = \frac{L_I \sqrt{\tilde{\eta}}}{1,1 \cdot p_3 \cdot x_M} \quad (75)$$

при замене  $L_I$  на  $x_B$ , где  $x_B$  расстояние от источника выброса до подветренной границы подветренной тени (см. рис. 7, б прил. 7).

При  $H \leq H_B$  коэффициент  $p_3$  устанавливается в зависимости от отношения  $\hat{u}_M/u_M$  по формулам (76а) – (76в):

$$p_3 = 3 \quad \text{при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} \leq 0,25; \quad (76а)$$

$$p_3 = 8,43 \left(1 - \frac{\hat{u}_M}{u_M}\right)^5 + 1 \quad \text{при } 0,25 < \frac{\hat{u}_M}{u_M} \leq 1, \quad (76б)$$

$$p_3 = 0,32 \frac{\hat{u}_M}{u_M} + 0,68 \quad \text{при } \frac{\hat{u}_M}{u_M} > 1. \quad (76в)$$

При  $H > H_B$  принимается  $p_3 = 1$ .

Для низких источников выбросов ( $H < 10$  м) коэффициент  $s$  в формуле (71а) заменяется на  $s_L$ , где  $s_L$  вычисляется по формулам (77а) – (77г):

$$s_L = 1 \quad \text{при } t_1 \leq 1 \text{ и } H \leq 2 \text{ м}, \quad (77а)$$

$$s_L = 0,125(10 - H) + 0,125(H - 2)s \quad \text{при } t_1 \leq 1 \text{ и } 2 < H < 10 \text{ м}, \quad (77б)$$

$$s_L = s + \frac{0,4}{t_1} \text{ при } t_1 > 1 \text{ и } H \leq 2 \text{ м,} \quad (77\text{В})$$

$$s_L = s + \frac{0,05(10 - H)}{t_1} \text{ при } t_1 > 1 \text{ и } 2 < H < 10 \text{ м.} \quad (77\text{Г})$$

Для определения  $\zeta_M$  находится вспомогательный угол  $\varphi_K$  (в градусах) в зависимости от отношения  $t_2$  по формулам (78а) – (78б):

$$\varphi_K = 136,5 \cdot t_2^4 - 364 \cdot t_2^3 + 273 \cdot t_2^2 \text{ при } t_2 \leq 1, \quad (78\text{а})$$

$$\varphi_K = 18 + \frac{28}{1 + 0,02 \cdot t_2^3} \text{ при } t_2 > 1, \quad (78\text{б})$$

$$t_2 = \frac{L_{\text{ш}}}{L_{\text{д}}}. \quad (79)$$

Безразмерный коэффициент  $\zeta_M$  определяется по формуле (80)

$$\zeta_M = 1 - \frac{1}{(1 + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot t_3 + 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t_3^2 + 9,2 \cdot 10^{-10} \cdot t_3^4)^4} \quad (80)$$

в зависимости от аргумента  $t_3$ :

$$t_3 = \varphi_K \sqrt{\hat{u}_M} \text{ при } \hat{u}_M \leq 5 \text{ м/с,} \quad (81\text{а})$$

$$t_3 = 2,24 \cdot \varphi_K \text{ при } \hat{u}_M > 5 \text{ м/с.} \quad (81\text{б})$$

Если рассчитанное значение  $\hat{\eta}_M$  удовлетворяет условию

$$\hat{\eta}_M \leq 1, \quad (82)$$

то принимают соотношения:

$$\hat{\eta}_M = 1, \quad (83\text{а})$$

$$\hat{c}_M = c_M, \quad (83\text{б})$$

$$\hat{u}_M = u_M, \quad (83\text{в})$$

$$\hat{x}_M = x_M. \quad (83\text{г})$$

9.2.3. В тех случаях, когда основание источника выброса находится в зонах, где образование подветренной тени возможно только при направлении ветра, отличном от направления нормалей к стенам здания (рис. 6, б прил. 7), максимальная приземная концентрация ЗВ  $\hat{c}_M$  достигается при направлении ветра, соответствующем переносу атмосферного воздуха к источнику выброса (точка 0 на рис. 6, б прил. 7) от ближайшего к нему угла здания. Расчет  $\hat{\eta}_M$  проводится при этом по формулам, приведенным в подп. 9.2.2 со следующими изменениями:

– для определения того, какая из сторон здания при указанном направлении ветра является подветренной, через центр здания (рис. 8

прил. 7) проводится прямая  $Q$  по направлению ветра. Если эта прямая находится внутри или на границах угла, который образован диагоналями, примыкающими к более длинной стороне здания (например, к стороне  $CD$  на рис. 8 прил. 7), то данная сторона рассматривается как подветренная, и ее длина обозначается  $L_{\text{ш}}$ , а длина смежной стороны –  $L_{\text{д}}$ . В противном случае подветренной является более короткая сторона здания;

– определяется  $L_{\text{зв}}$  по формуле (67) с использованием полученного значения  $L_{\text{ш}}$ ;

– величина  $\zeta_{\text{м}}$  вычисляется по формулам (84а) – (84б):

$$\zeta_{\text{м}} = 0,5(\zeta' + \zeta'') \text{ при } \gamma \leq \varphi_{\text{к}}, \quad (84\text{а})$$

$$\zeta_{\text{м}} = 0,5(\zeta' - \zeta'') \text{ при } \gamma > \varphi_{\text{к}}, \quad (84\text{б})$$

где  $\gamma$  – положительный острый угол (в градусах) между направлением ветра и нормалью подветренной стены здания (рис. 8 прил. 7);

$\zeta'$  – коэффициент, рассчитываемый по формуле (80) как значение  $\zeta_{\text{м}}$ , вычисленное по аргументу  $t_3$  (формула (81)) при замене  $\varphi_{\text{к}}$  на  $(\varphi_{\text{к}} + \gamma)$ ;

$\zeta''$  – коэффициент, вычисляемый аналогично  $\zeta'$ , но при замене  $\varphi_{\text{к}}$  на  $|\varphi_{\text{к}} - \gamma|$ .

9.2.4. Для источников выброса, основание которых расположено вне зоны возможного образования подветренной тени (рис. 6, в, б, г прил. 7), максимальная концентрация ЗВ достигается при переносе атмосферного воздуха от здания к источнику выброса по нормали (см. рис. 6, в прил. 7) или по направлению от ближайшего угла здания (см. рис. 6, г прил. 7). Если при этом расстояние от источника выброса до границы ветровой тени  $x_{\text{в}}$  (см. рис. 6, в, б, г прил. 7) удовлетворяет условию  $x_{\text{в}} \leq 1,5 \cdot L_{\text{зв}}$  (где  $L_{\text{зв}}$  определяется в соответствии с подп. 9.2.3), то

$$\hat{\eta}_{\text{м}} = \hat{\eta}_{\text{мв}} - \frac{x_{\text{в}}}{1,5 \cdot L_{\text{зв}}} (\hat{\eta}_{\text{мв}} - 1), \quad (85)$$

где  $\hat{\eta}_{\text{мв}}$  определяется в соответствии с подп. 9.2.2, 9.2.3 как значение  $\hat{\eta}_{\text{м}}$  для источника выброса, расположенного на границе зоны подветренной тени.

При  $x_{\text{в}} > 1,5 \cdot L_{\text{зв}}$  принимается  $\hat{\eta}_{\text{м}} = 1$ .

9.2.5. При расположении основания источника выброса на крыше здания различают два случая: короткое здание  $L_{\text{д}} < 2 \cdot L_{\text{зв}}$  и длинное здание  $L_{\text{д}} > 2 \cdot L_{\text{зв}}$ .

При наличии короткого здания образуется объединенная крышно-подветренная тень и величина  $s$  в формуле (71а) рассчитывается по аргументу  $t_1$ , вычисленному по формуле (75) при замене  $L_I$  на  $x_B$ , где  $x_B$  – расстояние от источника выброса до подветренной границы подветренной тени (рис. 9, а прил. 7).

$$\tilde{s} = s \text{ при } L_d < 2 \cdot L_{ЗВ}. \quad (86а)$$

При наличии длинного здания расчет концентрации ЗВ в подветренной тени осуществляется с заменой  $s$  в формуле (71а) на коэффициент  $\tilde{s}$ , определяемый по формуле (86б):

$$\tilde{s} = \frac{x_B s_B - x_H s_H}{x_B - x_H} \text{ при } L_d \geq 2 \cdot L_{ЗВ}, \quad (86б)$$

где  $x_B$  и  $x_H$  – расстояния от источника выброса до наветренной и подветренной границ подветренной тени (рис. 9, б прил. 7) соответственно;

$s_H$  и  $s_B$  – коэффициенты, вычисляемые по формулам (74а) – (74г) как значения  $s$  при аргументе  $t_1$ , рассчитанном по формуле (75) при замене  $L_I$  на  $x_H$  и  $x_B$  соответственно.

Формулы (86а) и (86б) используются также для низких источников выбросов для определения коэффициента  $\tilde{s}_L$ , который подставляется в формулу (71а) вместо  $s_L$ , вычисленного по формулам (74а) – (74г). При этом в правой части формул (86а) – (86б) коэффициенты  $s$ ,  $s_B$  и  $s_H$  заменяются на соответствующие значения  $s_L$ .

Если источник выброса расположен на крыше длинного здания вне зоны крышной тени, то

$$H_B = H_3; \hat{u}_M = u_M, r_3 = p_3 = 1. \quad (87)$$

9.3. Расчет распределения концентрации загрязняющих веществ от одиночного точечного источника выброса при произвольно заданных направлениях и скоростях ветра.

9.3.1. До проведения расчетов распределения концентрации загрязняющих веществ от точечного источника выброса с учетом влияния застройки при произвольно заданных скорости и направлении ветра на плане местности через источник выброса проводится прямая линия, ориентированная вдоль ветра (см. рис. 8 прил. 7). Если эта линия не пересекает основание здания, то распределение приземных концентраций ЗВ рассчитывается по формулам, приведенным в п. 5 настоящей главы, без учета влияния здания. В случае пересечения здания линией на плане (см. рис. 8 прил. 7) учитывается влияние застройки.

При этом длина подветренной стороны здания определяется в соответствии с подп. 9.2.3.

Приземная концентрация ЗВ при произвольных значениях направления и скорости ветра рассчитывается по формуле (88)

$$\hat{c} = c_m r \hat{\eta}, \quad (88)$$

где  $c_m$  – концентрация ЗВ, определяемая в соответствии с подп. 9.1.2;  
 $r$  – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $u/\hat{u}_m$  по формулам (72а) – (72б);

$\hat{u}_m$  – опасная скорость ветра с учетом влияния застройки, определяемая в соответствии с подп. 9.2.2 – 9.2.5.

Последовательность расчета коэффициента  $\hat{\eta}$  рассмотрена в подп. 9.3.2 – 9.3.6 и выбирается в зависимости от того, находится ли основание источника выброса в зоне подветренной или зоне наветренной тени, расположен ли источник выброса на крыше здания, над зонами ветровой тени, с наветренной или подветренной стороны от указанных зон.

Построение границ зон ветровой тени осуществляется согласно подп. 9.1.5. При этом строится сечение здания вертикальной плоскостью, проходящей через источник выброса и ориентированной вдоль направления ветра (см. рис. 8 прил. 7), и по формулам, приведенным в подп. 9.1.5, определяются границы наветренной и подветренной зон ветровой тени.

9.3.2. При расположении основания источника выброса в зоне подветренной тени (рис. 10, а прил. 7) значение  $\hat{\eta}$  в точке, расположенной на расстоянии  $x$  от источника выброса вдоль оси факела и на удалении  $y$  от этой оси (см. рис. 8 прил. 7), определяется по формуле (89)

$$\hat{\eta} = (1 - \zeta)s_1s_2 + \zeta s'. \quad (89)$$

Коэффициент  $\zeta$ , зависящий от скорости ветра  $u$  и положительного острого угла  $\gamma$  между направлением ветра и нормалью подветренной стены здания (см. рис. 8 прил. 7), вычисляется по формуле (84) для  $\zeta_m$ , причем аргумент  $t_3$  находится по формуле (81) с заменой  $\hat{u}_m$  на  $u$ . При этом  $\varphi_k$  определяется по формулам (78а) – (78б).

Коэффициент  $s_1$  находится по формулам (25а) – (25е) в зависимости от отношения  $x/(p \cdot x_m)$ , а безразмерный коэффициент  $p$  – в зависимости от отношения  $u_m/\hat{u}_m$  по формулам (23а) – (23в).

Коэффициент  $s_2$  рассчитывается по формуле (28) в зависимости от скорости ветра  $u$  и аргумента  $t_y$  (формула (29)).

Коэффициент  $s'$  находится по формулам (90а) – (90в):

$$s' = \vartheta_1 \tilde{s}_2 \text{ при } x \leq x_B, \quad (90а)$$

$$s' = \vartheta_1 \tilde{s}_2 (1 - s'') + s_1 s_2 s'' \text{ при } x_B < x \leq L', \quad (90б)$$

$$s' = s_1 s_2 \text{ при } x > L', \quad (90в)$$

где

$$L' = px_M \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B \leq px_M, \quad (91а)$$

$$L' = x_B + 5 \cdot H_B \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B > px_M, \quad (91б)$$

$$s'' = \frac{2(x - x_B)}{p \cdot x_M + x - 2 \cdot x_B} \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B \leq px_M, \quad (92а)$$

$$s'' = \frac{x - x_B}{2 \cdot H_B + 0,06(x - x_B)} \text{ при } x_B + 5 \cdot H_B > px_M. \quad (92б)$$

Коэффициент  $\vartheta_1$  вычисляется по формулам (71а) – (71б), причем величины  $r_3$ ,  $\tilde{\eta}$  и  $s$  определяются согласно подп. 9.2.2. При этом значение  $s$  соответствует аргументу  $t_1$ , определенному по формуле (75) при замене  $L_I$  на  $x_B$ .

Коэффициент  $s_1$  в формуле (90б) вычисляется при  $x = L'$ .

Коэффициент  $\tilde{s}_2$  при  $x \leq x_B$  (т. е. внутри зоны подветренной тени) рассчитывается по формулам (93а) – (93б):

$$\tilde{s}_2 = 1 \text{ при } |y| \leq L_{3В}/2, \quad (93а)$$

$$\tilde{s}_2 = 0 \text{ при } |y| > L_{3В}/2. \quad (93б)$$

При  $x > x_B$  коэффициент  $\tilde{s}_2$  находится по формуле (28) как значение  $s_2$ , соответствующее аргументу

$$t_y = \frac{u \cdot y^2}{(x - x_B + 2,24 \cdot L_{3В} \sqrt{u})^2} \text{ при } u \leq 5 \text{ м/с}, \quad (94а)$$

$$t_y = \frac{5 \cdot y^2}{(x - x_B + 5 \cdot L_{3В})^2} \text{ при } u > 5 \text{ м/с}. \quad (94б)$$

9.3.3. При расположении основания источника выброса в зоне подпора – зоне наветренной тени (рис. 10, б прил. 7) коэффициент  $\tilde{\eta}$  рассчитывается по формуле (89). При этом величины  $\zeta$ ,  $s_1$  и  $s_2$  определяются согласно подп. 9.3.2, а коэффициент  $s'$  – по формулам (95а) – (95г):

$$s' = \vartheta_1 \tilde{s}_2 \text{ при } x \leq x_H, \quad (95а)$$

$$s' = \vartheta_1 \tilde{s}_2 \text{ при } x_K < x \leq x_B, \quad (95б)$$

$$s' = \tilde{\vartheta}_1 \tilde{s}_2 (1 - s'') + s_1 s_2 s'' \text{ при } x_B < x \leq L', \quad (95в)$$

$$s' = s_1 s_2 \text{ при } x > L'. \quad (95г)$$

В этом случае величина  $L'$  вычисляется по формулам (91а) – (91б), коэффициенты  $s''$  и  $\tilde{s}_2$  – по выражениям (92а) – (92б), (93а) – (93б) соответственно.

Коэффициент  $\vartheta_1$  вычисляется по формуле (71а) с использованием коэффициента  $s$ , определяемого по формулам (74а) – (74г) в зависимости от коэффициента  $t_1$ , вычисленного по выражению (75) с заменой  $L_I$  на  $x_H$ , где  $x_H$  – расстояние от источника выброса до здания (см. рис. 10, б прил. 7).

Для низких источников выброса вместо  $s$  используется коэффициент  $s_L$ , определяемый по формулам (77а) – (77г) в зависимости от коэффициента  $t_1$ , с учетом замены в формуле (75)  $L_I$  на  $x_H$ .

Коэффициент  $s_1$  в формуле (95в) вычисляется при  $x = L'$ .

Коэффициент  $\vartheta_1$  рассчитывается по формулам (96а) – (96б):

$$\tilde{\vartheta}_1 = r_3 \tilde{\eta} \tilde{s} \text{ при } \tilde{\vartheta}_1 > 1, \quad (96а)$$

$$\tilde{\vartheta}_1 = 1 \text{ при } \tilde{\vartheta}_1 < 1, \quad (96б)$$

где  $r_3$  и  $\tilde{\eta}$  определяются по подп. 9.2.2, а величина  $\tilde{s}$  – по формуле (97)

$$\tilde{s} = \frac{x_B s_B - x_K s_K}{x_B - x_K}. \quad (97)$$

Здесь  $x_H$  и  $x_K$  – расстояния от источника выброса до начала и конца здания соответственно;

$x_B$  – расстояние от подветренной границы подветренной тени до источника выброса (см. рис. 10, б прил. 7).

В случае  $L_d < 2 \cdot L_{зв}$  при расчетах в области  $x_B < x \leq L'$  в формуле (97) вместо  $x_K$  следует использовать величину  $x_H$ .

Коэффициенты  $s_B$  и  $s_K$  вычисляются по формулам (74а) – (74г) как значения  $s$ , соответствующие аргументу  $t_1$ , определенному по выражению (75) при замене  $L_I$  на  $x_B$  и  $x_K$  соответственно.

Для низких источников выбросов вместо  $\tilde{s}$  используется коэффициент  $\tilde{s}_L$ , вычисляемый согласно подп. 9.2.5 при использовании формул (77а) – (77г).

9.3.4. При расположении источника выброса на крыше здания (рис. 9 прил. 7) величина  $\hat{\eta}$  рассчитывается по формуле (89). При этом

величины  $\zeta$ ,  $s_1$  и  $s_2$  определяются согласно подп. 9.3.2. Коэффициент  $s'$  находится по формулам (98а) – (98в):

$$s' = \tilde{\vartheta}_1 \tilde{s}_2 \text{ при } x < x_B, \quad (98a)$$

$$s' = \tilde{\vartheta}_1 \tilde{s}_2 (1 - s'') + s_1 s_2 s'' \text{ при } x_B \leq x \leq L', \quad (98б)$$

$$s' = s_1 s_2 \text{ при } x > L', \quad (98в)$$

где  $\tilde{\vartheta}_1$  вычисляется по формулам (96а) – (96б). При этом коэффициенты  $r_3$ ,  $\hat{\eta}$  и  $\tilde{s}$  определяются с учетом положений подп. 9.2.2 и 9.2.5, а  $\tilde{s}_2$ ,  $s''$  и  $L'$  – согласно подп. 9.3.2. Коэффициент  $s_1$  в формуле (98б) вычисляется при  $x = L'$ .

9.3.5. Если основание источника выброса размещается с подветренной стороны от ветровой тени, причем  $x_B \leq 1,5 \cdot L_{ЗВ}$  (рис. 10, в прил. 7), то величина  $\hat{\eta}$  рассчитывается по формуле (99)

$$\hat{\eta} = \left[ \hat{\eta}_{МВ} - \frac{2 \cdot x_B}{3 \cdot L_{ЗВ}} (\hat{\eta}_{МВ} - 1) \right] s_1 s_2, \quad (99)$$

где  $\hat{\eta}_{МВ}$  определяется в соответствии с подп. 9.2.4 с заменой  $\zeta_M$  на коэффициент  $\zeta$ , вычисленный согласно подп. 9.3.2. При  $x_B > 1,5 \cdot L_{ЗВ}$  величина  $\hat{\eta}$  определяется по формуле (100)

$$\hat{\eta} = s_1 \cdot s_2. \quad (100)$$

9.3.6. При расположении источника выброса с наветренной стороны от ветровой тени на расстоянии  $x_H \leq 1,5 \cdot L_{ЗВ}$  (рис. 10, з прил. 7)  $\hat{\eta}$  рассчитывается по формуле (99). При этом в зоне наветренной тени коэффициент  $s_1$  заменяется на  $\zeta \tilde{s}_a + (1 - \zeta) s_1$ , а для подветренной зоны коэффициент  $s_1$  заменяется на  $\zeta \tilde{s}_b + (1 - \zeta) s_1$ , где – величина  $\tilde{s}_a$  вычисляется по формуле (97) с использованием в качестве  $x_K$  и  $x_B$  расстояний от источника выброса до начала  $x_H$  и конца  $x_K$  наветренной тени (см. рис. 10, з прил. 7);

– величина  $\tilde{s}_b$  вычисляется по формуле (97) с использованием в качестве  $x_K$  и  $x_B$  расстояний от источника выброса до начала ( $x_K$ ) и конца зоны подветренной тени ( $x_B$ ) соответственно (рис. 10, д прил. 7).

При  $x_H > 1,5 \cdot L_{ЗВ}$  расчет  $\hat{\eta}$  выполняется по формуле (100), причем в наветренной и подветренной зоне тени также производится замена коэффициента  $s_1$  на выражение  $\zeta \tilde{s}_a + (1 - \zeta) s_1$  и  $\zeta \tilde{s}_b + (1 - \zeta) s_1$  соответственно.

9.4. Расчет концентрации загрязняющих веществ от одиночного точечного источника выброса при наличии двух зданий.

9.4.1. Расчет распределения концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от точечного источника выброса при заданных направлении и скорости ветра при наличии двух зданий выполняется по аналогии с подп. 9.3.

До проведения расчетов на плане местности через точку, соответствующую расположению центра источника выброса, проводится прямая линия, ориентированная вдоль ветра. Если эта линия не пересекает основание зданий, то расчет распределения приземных концентраций ЗВ выполняется по формулам, приведенным в п. 5 настоящей главы, без учета влияния застройки. При пересечении линией одного из зданий (см. рис. 8 прил. 7) учитывается влияние застройки в соответствии с подп. 9.3. При пересечении линией на плане двух зданий определяется наличие объединенной ветровой зоны между зданиями. Если зоны подветренной тени от первого и наветренной тени от второго здания не перекрываются, и соответственно не образуется объединенной ветровой тени между зданиями, расчет распределения концентрации ЗВ проводится по формулам, приведенным в подп. 9.3.

Если источник выброса не расположен между зданиями (например, в точке  $O_1$  на рис. 11 прил. 7), то максимальные приземные концентрации ЗВ достигаются при переносе атмосферного воздуха от зданий к источнику выброса (см. рис. 6, в, г прил. 7), а расчет осуществляется в соответствии с подп. 9.2.2.

В случае образования объединенной ветровой тени (см. рис. 11 прил. 7) между зданиями при расчетах распределения концентрации ЗВ в межкорпусном дворе вспомогательный угол  $\varphi_k$  рассчитывается по формуле (101)

$$\varphi_k = 0,5(\varphi_{k1} + \varphi_{k2}), \quad (101)$$

где величина  $\varphi_{k1}$  определяется для первого по направлению ветра здания, а  $\varphi_{k2}$  – для второго по формулам (78а) – (78б). При этом угол  $\gamma$ , указанный в подп. 9.2.3, вычисляется по первому по направлению ветра зданию. При различии величин  $L_{зв1}$  и  $L_{зв2}$  зданий двора в качестве  $L_{зв}$  для расчетов по формуле (93) берут максимальную из них.

Если источник выброса расположен между зданиями (например, в точке  $O_3$  на рис. 11 прил. 7), то расчет  $\hat{c}_m$  осуществляется согласно подп. 9.2.2. При этом в случае образования объединенной зоны вет-

ровой тени (подп. 9.5) в формуле (75) вместо  $L_I$  используется величина  $x_B$ , определяемая как расстояние от источника выброса до второго здания – конца объединенной ветровой тени.

Коэффициент  $\tilde{\eta}$  для источника выброса, расположенного в межкорпусном дворе, определяется так же, как и для источника выброса, расположенного в подветренной тени согласно подп. 9.3.2.

Далее рассчитывается коэффициент  $\vartheta_1$  по формулам (71a) – (71б). При  $L_I > L_K$  и  $H < H_B$  полученное значение  $\vartheta_1$  умножается на отношение (102)

$$\vartheta_1 = \frac{H_B \cdot L_I + H \cdot L_K}{H \cdot L_I + H_B \cdot L_K}, \quad (102)$$

где  $L_K$  – протяженность объединенной зоны между зданиями, м;

$L_I$  – определенная согласно подп. 9.1.5 протяженность той зоны ветровой тени, высота которой использована при определении  $H_B$ , т. е. подветренной от первого здания или наветренной от второго здания, м.

В остальных случаях расчет выполняется в соответствии с подп. 9.3. При этом, если источник выброса расположен с наветренной стороны здания на расстоянии более  $1,5 \cdot L_{ЗВ}$ , то для участков факела примеси, приходящихся на зоны ветровой тени (включая межкорпусную), расчет производится в соответствии с подп. 9.3.6.

При равенстве высот ветровых теней отдельных зданий в точке расположения источника выброса в качестве  $L_I$  выбирается наибольшая из протяженностей ветровых теней этих зданий.

9.5. Расчет концентраций ЗВ от одиночного точечного источника выброса при наличии группы зданий.

9.5.1. При расчетах распределения концентраций загрязняющих веществ учитываются только здания, удовлетворяющие требованию подп. 9.1.3.

9.5.2. Для расчета распределения концентраций ЗВ при заданных направлении и скорости ветра в общем случае строится сечение застройки вертикальной плоскостью, проходящей через источник выброса в направлении ветра (рис. 12 прил. 7). При этом учитываются только те здания, для которых нормаль к подветренной стене (подп. 9.2.3) составляет с направлением ветра угол менее  $2 \cdot \varphi_K$ , где  $\varphi_K$  соответствует данному зданию.

При обтекании воздушным потоком нескольких зданий могут образовываться зоны наложения ветровой тени, полученные в результате

объединения ветровых теней отдельных зданий. Для их построения на сечении застройки относительно каждого здания наносятся зоны ветровых теней согласно подп. 9.1.5, после чего определяются зоны наложения ветровых теней отдельных зданий, которые могут быть следующих типов (см. рис. 12 прил. 7):

- а) содержащая источник загрязнения атмосферного воздуха – зона 1;
- б) ближайшая с подветренной стороны – зона 2;
- в) последующие с подветренной стороны – зона 3;
- г) ближайшая с наветренной стороны – зона 4.

Высота зоны наложения в различных точках полагается равной максимальной из высот ветровых теней, участвующих в образовании зоны наложения теней.

Зона наложения ветровых теней типа 4 используется для расчетов распределения концентраций загрязняющих веществ только в случае отсутствия ветровой тени типа 1.

С подветренной стороны от источника выброса в расчетах распределения концентраций ЗВ учитываются только две следующие зоны наложения (зоны 2 и 3 на рис. 12 прил. 7).

9.5.3. Дальнейший расчет распределения концентраций ЗВ проводится по подп. 9.4. При этом каждая зона наложения теней характеризуется вспомогательным углом  $\varphi_k$ , равным среднему из значений  $\varphi_k$  для зданий, ветровые тени которых учитываются при построении данной объединенной зоны.

При определении  $\varphi_k$  не учитываются здания, находящиеся внутри объединенной ветровой тени (см. рис. 12 прил. 7 – здание в зоне 1), стороны которых не касаются и не пересекают границы объединенной тени.

9.5.4. Здание сложной формы может быть представлено в виде нескольких параллелепипедов с нижним основанием на уровне земли. Конфигурация и размеры ветровой тени, возникающей при обтекании такого здания, воздушным потоком, определяются путем наложения зон для отдельных зданий и нахождения огибающей их границы.

9.6. Расчет концентраций загрязняющих веществ в случае выбросов из линейного источника выброса.

9.6.1. Если ветер направлен вдоль линейного источника выброса, расчет осуществляется в соответствии с подп. 9.2, причем величины  $c_m$ ,

$x_m$  и  $u_m$ , характеризующие приземные концентрации ЗВ при отсутствии застройки, определяются в соответствии с пп. 5, 6 и подп. 9.4 настоящей главы.

Если ветер направлен поперек линейного источника выброса длиной  $L$ , линейный источник разбивается на совокупность точечных источников, каждый из которых соответствует участку линейного источника выброса длиной  $L_{зв}$  и находится в середине этого участка. Если длина линейного источника  $L$  не кратна  $L_{зв}$ , то остаток от деления  $L$  на  $L_{зв}$  разбивается пополам и участки полученной длины относятся к краям линейного источника.

Параметры  $c_m$ ,  $x_m$  и  $u_m$  для указанных точечных источников выброса определяются согласно подп. 6.1 с использованием единых значений эффективного диаметра и объема. Расчет максимальных концентраций ЗВ осуществляется далее по подп. 9.2.5 для одного из точечных источников выброса. Максимальное из значений  $\hat{c}_m$ , соответствующих ветру вдоль и поперек линейного источника выброса, является максимальной приземной концентрацией загрязняющих веществ от линейного источника.

9.6.2. Линейный источник выброса разбивают на точечные источники также и при расчетах в случаях заданных направления и скорости ветра, расчетной точки в соответствии с подп. 9.3. При этом линейный источник длиной  $L$  разбивается на участки длиной  $\frac{L_{зв}}{\cos\gamma}$ .

9.6.3. При  $L_d < 2 \cdot L_{зв}$  два проема линейного источника выброса заменяются на условный линейный источник, расположенный посередине между проемами. При этом мощность выброса  $M$  для условного источника полагается равной суммарной мощности выброса из обоих проемов, а объем ГВС  $V_1$  – половине общего объема ГВС, выбрасываемой из линейного источника.

9.7. Расчет распределения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе по вертикали, на крыше и стенах здания.

9.7.1. Если основание источника выброса находится в зоне ветровой тени на крыше, то расчет концентрации ЗВ на крыше здания проводится по формулам (88) – (94) аналогично случаю расположения источника в зоне подветренной тени. При этом в качестве высоты источника выброса и высоты ветровой тени используются расстояния по нормали соответственно от устья источника и границы ветровой тени

до крыши (если указанные расстояния меньше 2 м, то в расчетах используются значения расстояний, равные 2 м). Если основание источника выброса расположено вне зоны ветровой тени, то расчет концентрации ЗВ на крыше проводится по формулам, приведенным в п. 5 настоящей главы, с использованием в качестве высоты источника выброса расстояния по нормали от его устья до крыши здания.

На подветренной стене здания концентрация загрязняющих веществ меняется линейно от полученного указанным способом значения на уровне крыши до вычисленного согласно подп. 9.2.5 значения приземной концентрации ЗВ. На наветренной стене здания концентрация ЗВ принимается равной нулю.

9.7.2. При расположении основания источника выброса в наветренной зоне (зоне подпора) на расстоянии  $x_H$  от здания ( $x_H < x_M$ ) расчет концентрации  $c_{ст}$  ЗВ, достигающейся в точке наветренной стены на высоте  $z$  над поверхностью земли при скорости ветра  $u$ , производится по формулам (103а) – (103б):

$$c_{ст} = c_M r [\zeta \vartheta_1 \tilde{s}_2 + (1 - \zeta) s_z s_2] \text{ при } z \leq H_{вIII}, \quad (103а)$$

$$c_{ст} = c_M r s_z s_2 \text{ при } z > H_{вIII}. \quad (103б)$$

В данном случае коэффициенты  $\vartheta_1$ ,  $\zeta$ ,  $\tilde{s}_2$  и  $s_2$  находятся по подп. 9.3.3 при скорости ветра  $u$ , а коэффициент  $r$  вычисляется по формулам (21а) и (21б) в зависимости от отношения  $u/\hat{u}_M$ .

Коэффициент  $s_z$  в зависимости от отношений  $z/[H(1 + 5 \cdot d_2)]$  и  $x/(px_M)$  определяется согласно подп. 9.8, а безразмерный коэффициент  $d_2$  – в зависимости от отношения  $v_M/u$  и параметра  $f$  по формулам (108а), (108б), причем  $v_M$  и  $u$  вычисляются по параметрам выброса источника согласно формулам, приведенным в п. 5 настоящей главы.

После подстановки  $s_z = s_1$  формула (103а) используется также для расчета концентрации ЗВ на наветренной стене здания при  $x_H > x_M$ .

При  $\zeta = 0$  формула (103а) может быть использована также для расчета концентрации ЗВ в заданной точке над поверхностью земли (при отсутствии застройки).

Концентрация ЗВ на крыше здания  $c_{кр}$  в точке с координатами  $(x, y)$  относительно источника выброса находится по формуле (104)

$$c_{кр} = c_M r \left[ \zeta \tilde{s}_2 \frac{\vartheta_1(x_K - x) + \tilde{\vartheta}_1(x - x_H)}{x_K - x_H} + (1 - \zeta) s_z s_2 \right], \quad (104)$$

где  $x_k$  – координата подветренной стены здания относительно источника выброса, а величины  $\vartheta_1$  и  $\tilde{\vartheta}_1$  определяются по подп. 9.3.3. При этом  $s_2$  и  $\tilde{s}_2$  рассчитываются по подп. 9.3.2 для рассматриваемой точки крыши, а  $s_z$  находится в зависимости от отношений  $H_3/[H(1 + 5 \cdot d_2)]$  и  $x/(p \cdot x_M)$  по подп. 9.8.

На подветренной стене здания концентрация загрязняющих веществ меняется линейно от значения, вычисленного по формуле (104) при  $x = x_k$  для уровня крыши, до значения  $\hat{c}$  приземной концентрации загрязняющих веществ.

9.7.3. При расположении источника выброса в зоне подветренной тени концентрация  $c_{ст}$  ЗВ на подветренной стене здания принимается равной приземной концентрации  $\hat{c}$  ЗВ у подветренной стены (при том же значении  $y$ ), определяемой по подп. 9.3.1. На наветренной стене здания концентрация ЗВ принимается равной нулю. В случае  $L_d < 2 \cdot L_{зв}$  концентрация ЗВ на крыше здания  $c_{кр}$  принимается равной  $\hat{c}(1 - L_d/2 \cdot L_{зв})$ . При  $L_d > 2 \cdot L_{зв}$  принимается  $c_{кр} = 0$ .

При расположении устья источника выброса за подветренной зоной по направлению ветра (см. рис. 10, в прил. 7) за пределами ветровой тени концентрация ЗВ на крыше и стенах здания принимается равной нулю.

9.7.4. При расположении источника выброса с наветренной стороны от ветровых теней здания расчет концентрации ЗВ на крыше и стенах здания производится в соответствии с подп. 9.3.6. При этом вместо коэффициента  $s_1$ , как и в формулах (103а), (103б), (104), используется коэффициент  $s_z$ , который вычисляется в соответствии с подп. 9.8.

9.8. Безразмерный коэффициент  $s_z$  определяется в зависимости от параметров  $b_1$  и  $b_2$  по формулам (105а) – (105б)

$$s_z = s_1(b_1) \frac{1 + 0,1(b_2 - 1)^2}{b_1^3 + 0,1(b_2 - 1)^2} \left( 1 + \frac{(b_2 + 0,2)(b_1^3 - 1)}{b_2 + (b_2 + 0,2) + (b_2 - 1)^2} \right) \quad (105а)$$

при  $b_1 \leq 1$ ;

$$s_z = s_1(b_1) \text{ при } b_1 > 1. \quad (105б)$$

При этом коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$  вычисляются в зависимости от высоты  $H$  и параметров выброса ( $M$ ,  $D$ ,  $w_0$ ,  $T_r$ ) рассматриваемого источника, а также от координат  $x$  и  $z$  расчетной точки, по формулам

(106), (107), (108a) и (108б), в которых обозначения переменных соответствуют обозначениям, приведенным в п. 5 настоящей главы:

$$b_1 = x/x_{м.и}, \quad (106)$$

$$b_2 = \frac{z}{H(1 + 5 \cdot d_2)}, \quad (107)$$

где

$$d_2 = 0,06 \frac{v_M}{u} \sqrt[3]{f} + 0,034 \left( \frac{v_M}{u} \right)^3 \quad \text{при } f < 100, \quad (108a)$$

$$d_2 = 0,28 \frac{v'_M}{u} + 0,034 \left( \frac{v'_M}{u} \right)^3 \quad \text{при } f \geq 100. \quad (108б)$$

При  $f_e \leq f < 100$  коэффициент  $d_2$  вычисляется по формуле (108a) при  $f = f_e$ ; при  $v_M < 0,5$  в формуле (108a) принимается  $v_M = 0,5$ ; при  $v'_M < 0,5$  в формуле (108б) принимается  $v'_M = 0,5$ .

## **10. Метод расчета долгопериодных средних концентраций ЗВ в атмосферном воздухе [1]**

10.1. Расчет поля долгопериодных средних концентраций ЗВ от одиночного точечного источника выброса.

10.1.1. Для расчета поля долгопериодных средних концентраций от одиночного точечного источника выброса значения осредненной мощности  $M$  выброса ЗВ, осредненной скорости  $w_0$  выхода ГВС из устья источника и ее вертикальной составляющей  $w_s$ , объемного расхода  $V_1$  ГВС и осредненного перегрева ГВС относительно окружающего атмосферного воздуха  $\Delta T$  определяются в соответствии с методиками расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками [4]. В случае отсутствия в указанных методиках необходимых сведений практические расчеты по формулам, приведенным в п. 10 настоящей главы, в соответствующих отраслях не производятся.

Другие параметры выброса определяются так же, как при расчете максимальных разовых концентраций ЗВ (подп. 5.2).

10.1.2. Для источников выбросов с постоянными в течение рассматриваемого периода времени параметрами выброса долгопериодные средние приземные концентрации  $C$  ЗВ определяются по формуле (109)

$$C(r_p, \varphi_p) = \frac{p_1(\varphi)M}{r_p} C'(r_p, \varphi_p), \quad (109)$$

где  $r_p$  и  $\varphi_p$  – полярные координаты расчетной точки относительно источника выброса;

$p_1(\varphi)$  – функция, характеризующая угловое распределение концентрации ЗВ, которая выражается через розу ветров для рассматриваемого периода времени (подп. 10.2.2).

Функция  $C'(r_p, \varphi_p)$  рассчитывается по формуле (110)

$$C'(r_p, \varphi_p) = \int_0^\infty du \int_0^\infty p_2(u)p_3(\lambda) q_i(r_p, u, \varphi_p, \lambda, H_e) d\lambda, \quad (110)$$

где  $u$  – скорость ветра на уровне флюгера ( $z_\phi = 10$  м), м/с;

$\lambda$  – безразмерный параметр, характеризующий условия турбулентного перемешивания, рассчитываемый по формуле (111);

$p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$  – соответствующие рассматриваемому периоду времени плотности вероятностей параметров  $u$  и  $\lambda$  (подп. 10.2);

$q_i(r_p, u, \varphi_p, \lambda, H_e)$  – подынтегральная функция, формулы для определения которой с учетом влияния рельефа местности и застройки приведены в подп. 10.5;

$H_e$  – эффективная высота источника выброса, определяемая согласно подп. 10.1.3, м.

$$\lambda = \frac{K_1}{z_1 u_1}, \quad (111)$$

где  $K_1$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена на уровне  $z_1 = 1$  м, м<sup>2</sup>/с;

$u_1$  – скорость ветра на уровне  $z_1 = 1$  м, м/с.

Упрощенный метод расчета среднегодовых концентраций, не связанный с использованием указанных плотностей вероятностей, приведен в подп. 10.6.

10.1.3. Эффективная высота источника выброса  $H_e$  вычисляется по формуле (112)

$$H_e = H + \Delta H, \quad (112)$$

где  $\Delta H$  – начальный подъем факела, т. е. эффективное изменение высоты источника выброса под влиянием начальной скорости и/или перегрева выбрасываемой из источника газовой (пылегазовой) смеси за счет скоростного напора и/или сил плавучести.

Для источника выброса с круглым устьем значение  $\Delta H$  устанавливается в зависимости от  $u$ ,  $\lambda$  и параметров выброса, по которым рассчитываются вспомогательные величины  $F_m, \text{м}^4/\text{с}^2$ , и  $F_b, \text{м}^4/\text{с}^2$ :

$$F_m = w_s^2 D^2 \frac{T_a}{4(T_a + \Delta T)}, \quad (113a)$$

$$F_b = g w_0 D^2 \frac{\Delta T}{4(T_a + \Delta T)}, \quad (113б)$$

где  $T_a$  – средняя абсолютная температура атмосферного воздуха за рассматриваемый период времени, К;

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Температура  $T_a$  определяется по формуле  $T_a = 273 + t_a$ , где  $t_a, ^\circ\text{С}$  – средняя температура атмосферного воздуха за период времени, использованный при определении функций  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$  (подп. 10.2.1). При расчетах допускается использовать постоянное значение  $T_a$ , равное 283 К.

При выполнении неравенства  $0 > \Delta T \geq -5 ^\circ\text{С}$  расчет  $\Delta H$  проводится для  $\Delta T = 0$ .

При  $\lambda \geq 0,02$  начальный подъем факела определяется по формуле (114a)

$$\Delta H = \Delta H_1, \quad (114a)$$

где

$$\Delta H = 3,75 \frac{\sqrt{(1 + \Delta T/T_a) F_m}}{u} + 4,94 \frac{(1 + \Delta T/T_a) F_b}{u^3}. \quad (114б)$$

При  $\lambda < 0,02$  значение  $\Delta H$  вычисляется как минимальное из значений  $\Delta H_1$  и  $\Delta H_2$ . При этом  $\Delta H_2$  определяется на основе следующего алгоритма:

а) величина  $S'$  принимается равной  $6,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2}$  при  $0,01 \leq \lambda \leq 0,02$  и  $1,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-2}$  при  $\lambda < 0,01$ ;

б) для источников выбросов высотой  $\Delta H > 10 \text{ м}$  определяется скорость ветра  $u_H$

$$u_H = u[0,6667 + 0,1448 \cdot \ln(H)]; \quad (115)$$

при  $\Delta H < 10 \text{ м}$  полагается  $u_H = u$ ;

в) вычисляется значение  $\Delta T_c$  по формуле (116a)

$$\Delta T_c = 0,019582(T_a + \Delta T)w_s\sqrt{S'}; \quad (116a)$$

г) при  $\Delta T > \Delta T_c$  значение  $\Delta H_2$  определяется по формуле (116б)

$$\Delta H_2 = 2,6 \left( \frac{F_b}{u_H S'} \right)^{1/3}; \quad (116б)$$

д) при  $\Delta T \leq \Delta T_c$  значение  $\Delta H_2$  находится по формуле (116в)

$$\Delta H_2 = 1,5 \left( \frac{F_m}{u_H \sqrt{S'}} \right)^{1/3}. \quad (116в)$$

Если источник выброса оборудован специальным укрытием или выброс из источника осуществляется в горизонтальном направлении, то в формулах (114б) и (116в)  $F_m = 0$ .

Для источников выбросов с прямоугольным устьем расчет  $\Delta H$  проводится по приведенным выше формулам с использованием эффективного диаметра устья источника  $D_э$ , м, и соответствующего эффективного объемного расхода ГВС  $V_{1э}$ , м<sup>3</sup>/с, которые определяются по формулам (31) – (33).

10.1.4. Для источников выбросов, параметры выброса которых изменяются в течение рассматриваемого периода времени более чем на 10 %, расчет долгопериодных средних концентраций ЗВ проводится по одному из алгоритмов, приведенных в подп. 10.1.4.1 – 10.1.4.3.

10.1.4.1. Для источника выброса, мощность выброса которого определяется метеорологическими параметрами  $u$  и  $\lambda$ , например для пылящей поверхности,  $C'(r_p, \varphi)$  вычисляется по формуле (117)

$$C'(r_p, \varphi) = \int_0^{\infty} du \int_0^{\infty} F(u, \lambda) p_2(u) p_3(\lambda) q_i(r_p, u, \varphi_p, \lambda, H_e) d\lambda, \quad (117)$$

где  $F(u, \lambda)$  – функция, характеризующая изменчивость мощности выбросов в зависимости от метеорологических параметров  $u$  и  $\lambda$  по отношению к ее характерному (например, среднему) значению  $M$ .

10.1.4.2. Для источников, параметры выброса которых не зависят от метеорологических параметров  $u$  и  $\lambda$ , расчет проводится по формулам (109) – (116в). При этом  $M$ ,  $V_1$ , и  $\Delta T$  задаются средними за рассматриваемый период времени значениями в соответствии с подп. 10.1.

10.1.4.3. В общем случае для источника с переменными параметрами выброса рассматриваемый период времени разбивается на непесекающиеся интервалы, каждый из которых соответствует изменяющимся в пределах  $\pm 10$  % значениям этих параметров. Для каждого из

указанных интервалов продолжительностью  $\tau_j$  с использованием соответствующих этому интервалу функций  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$  (подпункт 10.2) по формулам (109) – (117) определяется средняя концентрация  $C_j(r_p, \varphi_p)$  ЗВ, а затем находится средняя за рассматриваемый период времени концентрация ЗВ по формуле (118)

$$C_j(r_p, \varphi_p) = \sum_{(j)} \frac{\tau_j}{\tau_\Sigma} C_j(r_p, \varphi_p), \quad (118)$$

где  $\tau_\Sigma$  – общая продолжительность рассматриваемого периода времени.

10.1.5. Интегралы в формулах (110) и (117) вычисляются по области изменения  $u$  и  $\lambda$  в данной местности за рассматриваемый период времени. При этом допускается использование квадратурных формул, обеспечивающих во всех узлах расчетной сетки относительную погрешность не более 3 %.

10.1.6. Расчет долгопериодных средних концентраций загрязняющих веществ при наличии данных о коэффициентах трансформации проводится с учетом их частичной трансформации в соответствии с подп. 4.3. Пример расчета долгопериодных средних концентраций для окислов азота приведен в прил. 5.

10.2. Учет распределения метеорологических параметров при расчете долгопериодных средних концентраций ЗВ в атмосферном воздухе.

10.2.1. При расчете долгопериодных средних концентраций загрязняющих веществ изменчивость во времени метеорологических параметров характеризуется функциями  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$ .

При вычислении средних концентраций загрязняющих веществ для конкретного интервала времени используются выборочные оценки указанных функций по данным измерений в течение этого интервала времени.

При вычислении математического ожидания и максимальных значений (по подп. 10.4) долгопериодных средних концентраций ЗВ используются климатические данные, указанные в подп. 4.6 (в случае их наличия), или выборочные оценки указанных функций, полученные для рассматриваемого периода времени по ряду наблюдений продолжительностью не менее пяти лет.

Для приближенных оценок функций  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$  допускается использование данных наблюдений продолжительностью не менее трех лет.

Требования к расчету максимальных значений долгопериодных средних концентраций ЗВ в атмосферном воздухе, в том числе по учету межгодовой изменчивости, изложены в подп. 10.4.

10.2.2. Функция  $p_1(\varphi)$  определяется по розе ветров  $P_j$ , соответствующей рассматриваемому интервалу времени. При этом повторяемость штилей  $P_0$  исключается из рассмотрения, а повторяемости румбов  $P_j$  ( $j = 1, 2, 3 \dots$ ) нормируются по формуле (119)

$$P'_j = \frac{P_j}{\sum_{(j)} P_j}. \quad (119)$$

Значения  $p_1(\varphi)$  определяются таким образом, чтобы выполнялись условия

$$\int_{\varphi_j - \delta}^{\varphi_j + \delta} p_1(\varphi) d\varphi = P'_j, \quad (120)$$

где  $\delta$  – полуширина румба.

Середине румба  $j$  соответствует отличающееся от направления ветра на  $180^\circ$  направление факела  $\varphi$ . Внутри каждого румба функция  $p_1(\varphi)$  аппроксимируется полиномом второго порядка, коэффициенты которого находятся из формулы (120) и условий непрерывности  $p_1(\varphi)$  при переходе через границы румбов.

При аппроксимации функции  $p_1(\varphi)$  должно быть выполнено условие  $p_1(\varphi) > 0$ .

10.2.3. Выборочная оценка плотностей вероятности  $p_1(\varphi)$  и  $p_2(u)$  проводится по данным регулярных наблюдений за направлением и скоростью ветра на уровне флюгера (около 10 м над подстилающей поверхностью), выполненных на репрезентативной для рассматриваемой местности метеостанции.

При расчетах долгопериодных средних концентраций загрязняющих веществ на территории города должны использоваться данные наблюдений на загородных метеостанциях или на таких городских метеостанциях, ветровой режим которых не подвержен влиянию застройки.

10.2.4. Для выборочной оценки плотности вероятностей  $p_3(\lambda)$  используются данные регулярных срочных наблюдений за основными метеорологическими элементами (температурой и влажностью атмосферного воздуха, скоростью ветра), производимых одновременно

на нескольких высотах в приземном слое атмосферного воздуха (далее – градиентные наблюдения) на теплосбалансовых станциях. При этом значения  $\lambda$ , используемые при оценке  $p_3(\lambda)$ , определяются по формуле (121)

$$\lambda = 1,15 \frac{K_1}{z_1 u_2}, \quad (121)$$

где  $K_1$  – значение коэффициента вертикального турбулентного обмена за указанные сроки наблюдений на уровне  $z_1 = 1$  м, м<sup>2</sup>/с;

$u_2$  – измеренная в рассматриваемый срок наблюдения скорость ветра на уровне  $z = 2$  м, м/с.

При отсутствии данных градиентных наблюдений значения функции  $p_3(\lambda)$  могут быть получены по запросу в территориальных органах Росгидромета либо в организациях, имеющих лицензию на осуществление деятельности в области гидрометеорологии и в смежных с ней областях (за исключением указанной деятельности, осуществляемой в ходе инженерных изысканий, выполняемых для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства).

10.3. Расчет долгопериодных средних концентраций ЗВ от группы точечных, линейных и площадных источников загрязнения атмосферного воздуха.

10.3.1. Долгопериодная средняя концентрация ЗВ  $C$  при наличии  $N$  источников выбросов определяется как сумма долгопериодных средних концентраций ЗВ от отдельных источников

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_N, \quad (122)$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_N$  – концентрации загрязняющих веществ соответственно от первого, второго,  $N$ -го источника в рассматриваемой расчетной точке.

Концентрации  $C_1, C_2, \dots, C_N$  ЗВ могут соответствовать точечным, линейным и площадным источникам выбросов.

В случае, когда имеются неучтенные источники выброса того же ЗВ (п. 11 настоящей главы), в правую часть формулы (122) добавляется слагаемое  $C'_ф$ , характеризующее фоновое загрязнение атмосферного воздуха от неучтенных источников выброса.

10.3.2. Долгопериодная средняя концентрация  $C_l$  ЗВ от линейного источника выброса, расположенного вдоль отрезка  $l$  длиной  $L$ , рассчитывается по формуле (123)

$$C_l(x, y) = \frac{1}{L} \int_l C(x - \xi, y - \eta) dl, \quad (123)$$

где  $C(x, y)$  – концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке  $(x, y)$  точечным источником выброса, находящимся в точке  $(\xi, \eta)$  отрезка  $l$ , интеграл в формуле (123) вычисляется вдоль этого отрезка. Подынтегральная функция в формуле (123) рассчитывается по формулам, приведенным в подп. 10.1.

При расчетах для аэрационного фонаря подынтегральная функция в формуле (123) рассчитывается с использованием суммарного выброса из фонаря и эффективного диаметра, определяемого по формуле (37).

Погрешность численного интегрирования при расчете концентраций ЗВ от линейных источников выброса во всех расчетных точках по формуле (123) не должна превышать 3 %.

Точки линейного источника выброса, принадлежащие отрезку  $l$ , определяются из условия, что в декартовой системе координат с началом в расчетной точке и осью  $x$ , ориентированной по направлению ветра, их абсциссы отрицательны.

Для линейного источника, мощность выброса от которого изменяется вдоль отрезка  $l$ , подынтегральная функция в формуле (123) умножается на функцию  $G_0(\xi, \eta)$ , характеризующую изменение мощности выброса вдоль рассматриваемого источника по отношению к ее характерному значению, применяемому при расчете  $C$ . Изменение мощности выброса учитывается и конкретный вид функции  $G_0(\xi, \eta)$  задается при наличии утвержденной в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, методики расчета выбросов ЗВ в атмосферный воздух стационарными источниками для рассматриваемого производства [4]. В случае отсутствия соответствующей методики учет изменения мощности выброса не осуществляется.

10.3.3. Долгопериодная средняя концентрация  $C_s(x, y)$  ЗВ от площадного источника выброса, занимающего область  $S$  площадью  $S_{\Pi}$ , рассчитывается по формуле (124)

$$C_s(x, y) = \frac{1}{S_{\Pi}} \iint_S C(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta, \quad (124)$$

где  $C_s(x, y)$  – осредненная за этот период времени концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке  $(x, y)$  точечным источником выброса, находящимся в точке  $(\xi, \eta)$  области  $S_{\Pi}$ , по которой вычисляется интеграл.

Типы источников выбросов, которые могут аппроксимироваться площадными источниками, перечислены в подп. 8.8.

Подынтегральная функция в формуле (124) вычисляется по формулам, приведенным в подп. 10.1, с использованием суммарного выброса от всего площадного источника.

Для площадного источника, мощность выброса которого изменяется от точки к точке, подынтегральную функцию в формуле (124) следует умножить на функцию  $G_0(\xi, \eta)$ , характеризующую изменение удельной мощности выброса в точках рассматриваемого источника по отношению к ее характерному значению, применяемому при расчете  $C$ . Изменение мощности выброса учитывается и конкретный вид функции  $G_0(\xi, \eta)$  задается при наличии утвержденной в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, методики расчета выбросов ЗВ в атмосферный воздух стационарными источниками для рассматриваемого производства [4]. В случае отсутствия соответствующей методики учет изменения мощности выброса не осуществляется.

Таким же образом с заменой в формуле (124) двойного интеграла на тройной аналогично формуле (64) проводится расчет среднегодовых концентраций от объемного источника выброса.

Применяемые алгоритмы интегрирования должны обеспечивать вычисление концентраций ЗВ во всех расчетных точках с погрешностью не более 3 %.

10.3.4. Требования к шагам расчетной сетки и общему количеству ее узлов принимаются в соответствии с подп. 8.10.

10.4. Расчет максимальных значений долгопериодных средних концентраций ЗВ в атмосферном воздухе.

10.4.1. Максимальные значения долгопериодных средних концентраций  $C_{\max}$  ЗВ вычисляются по формуле (125)

$$C_{\max} = (1 + V_C)C, \quad (125)$$

где  $C$  – осредненные концентрации ЗВ, относящиеся к средним за рассматриваемый период времени метеорологическим условиям согласно подп. 10.2;

$V_C$  – соответствующий коэффициент вариации.

10.4.2. Значение  $V_C$  определяется по формуле (126)

$$V_C = \sigma_C / C, \quad (126)$$

где  $\sigma_C$  – стандартное отклонение долгопериодных средних концентраций ЗВ.

Значения  $\sigma_C$  должны определяться в каждом узле сетки по значениям долгопериодной средней концентрации ЗВ, рассчитанным для не менее чем пяти последовательных лет.

При наличии данных систематического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха допускается определение  $V_C$  по экспериментальным данным на основе не менее чем пятилетнего ряда наблюдений за рассматриваемым ЗВ. При этом коэффициенты вариации должны рассчитываться для каждого поста наблюдений в отдельности. В качестве  $V_C$  должно приниматься максимальное из рассчитанных значений.

При расчете среднегодовых концентраций загрязняющих веществ в случае отсутствия необходимой исходной информации для расчета стандартного отклонения в формуле (126) и данных мониторинга загрязнения атмосферного воздуха допускается определять  $C_{\max}$  по формуле (125) при  $V_C = 0,5$ .

10.5. Расчетные формулы для определения подынтегральных функций.

10.5.1. Подынтегральные функции  $q_i(r_p, u, \varphi_p, \lambda, H_e)$  в формулах (110) и (117) вычисляются с использованием вспомогательной функции  $G$

$$G = \frac{\eta'}{uH_e} f_1(\xi) \left( \frac{k_{pa} r_{m0}}{r} \exp \left[ 1 - \frac{k_{pa} r_{m0}}{r} \right] \right)^{n'}, \quad (127)$$

где  $\eta' = \sqrt{\eta}$ ;

$\eta$  – определяемый по формуле (41) безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$H_e$  – определяется согласно подп. 10.1.3.

$$f_1 = 0,276 + \frac{0,324}{1 + 11,4 \cdot \xi} \exp(0,636 \cdot \xi^{1,5}) \text{ при } \xi \leq 2, \quad (128a)$$

$$f_1 = 0,276 + \frac{0,466}{\xi + 3,5} \text{ при } \xi < 2, \quad (128b)$$

$$\xi = \frac{H_e}{h}, \quad (129)$$

$$k_{\text{pa}} = \frac{1}{\eta^{1/n'} [1,05 + 0,05(\eta - 1)^{0,1}]'} \quad (130)$$

$$r_{\text{m0}} = (1,09 + 0,65 \cdot \xi^{1,2}) \frac{H_e}{\lambda \eta'}, \quad (131)$$

$$n' = \frac{1 + 0,37 \cdot \xi^{1,4}}{1 + 0,74 \cdot \xi^{1,4}} \text{ при } r_p \leq l_{\text{pa}} r_{\text{m0}}, \quad (132a)$$

$$n' = \frac{1 + 0,48 \cdot \xi^{1,5}}{1 + 0,96 \cdot \xi^{1,5}} \text{ при } r_p > l_{\text{pa}} r_{\text{m0}}. \quad (132б)$$

Значение  $h$  в формуле (129) находится из соотношения

$$h = t_{\text{зв}} u \lambda \text{ при } u \cdot \lambda \leq 0,283 \text{ м/с}, \quad (133a)$$

$$h = 150 \text{ м при } u \cdot \lambda > 0,283 \text{ м/с}, \quad (133б)$$

где  $t_{\text{зв}} = 530 \text{ с}$ .

10.5.2. Долгопериодная средняя концентрация нерастворимых ЗВ или концентрация растворимых ЗВ, осредненная за период времени, в который отсутствовали осадки, согласно подп. 10.5.3 определяется с использованием подынтегральной функции  $q_0$  (т. е.  $q_i$  при  $i = 0$ )

$$q_0 = G + G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \text{ при } H_e \leq 10h, \quad (134a)$$

$$q_0 = 0 \text{ при } H_e > 10h, \quad (134б)$$

где вспомогательная функция  $G$  определена по формуле (127), а параметры  $G_1 \dots G_4$  вычисляются по формуле (127) при замене  $H_e$  на  $20 \cdot h - H_e$ ,  $20 \cdot h + H_e$ ,  $40 \cdot h - H_e$ ,  $40 \cdot h + H_e$  соответственно.

10.5.3. Для периодов времени с осадками подынтегральная функция  $q_1$  (т. е.  $q_i$  при  $i = 1$ ) вычисляется по формуле (135)

$$q_1 = q_0 \cdot e^{-r_p/R_p}. \quad (135)$$

Значение  $R_p$  рассчитывается по формуле (136)

$$R_p = 4,8 \frac{u}{\alpha_0} \left( \frac{I_0}{I} \right)^{0,5}, \quad (136)$$

где  $I$  – средняя интенсивность осадков за рассматриваемый период времени, мм/ч;

$\alpha_0$ ,  $\text{с}^{-1}$  – коэффициент вымывания рассматриваемого ЗВ твердыми либо жидкими осадками интенсивностью  $I_0 = 1 \text{ мм/ч}$ .

Коэффициент вымывания  $\alpha_0$  зависит от физико-химических свойств и дисперсного состава вымываемого ЗВ. Для мелкодисперсного аэрозоля диаметром не более 10 мкм и диоксида серы в расчетах коэффициент вымывания следует принимать равным  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

По остальным ЗВ  $\alpha_0$  устанавливаются с использованием данных натуральных и лабораторных экспериментов по определению характеристик вымывания этих ЗВ в атмосфере.

В случае, когда значения  $\alpha_0$  не установлены, для растворимых ЗВ допускается вычисление  $q_1$  по формулам (137а) – (137б)

$$q_1 = q_0 \text{ при } I \leq I_B, \quad (137a)$$

$$q_1 = 0 \text{ при } I > I_B, \quad (137б)$$

где  $I_B = 0,17$  мм/ч.

При этом для растворимых загрязняющих веществ функции распределения  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$  оцениваются для части интервала времени, соответствующей отсутствию осадков, а долгопериодные средние концентрации ЗВ вычисляются по формуле (118), в которой при наличии осадков принимается  $C_j(r_p, \varphi_p)$ .

10.5.4. Влияние рельефа местности на поле долгопериодных средних концентраций ЗВ учитывается с помощью безразмерного коэффициента влияния рельефа  $\eta$ . Этот коэффициент определяется согласно п. 7 настоящей главы для сечений рельефа местности, соответствующих восьми направлениям оси факела вдоль середины румбов, которые использованы при определении функции  $p_1(\varphi)$  по формулам, приведенным в подп. 10.2. Для промежуточных направлений значение  $\eta$  устанавливается с помощью линейной интерполяции.

При наличии в окрестности источника выброса выраженной формы рельефа, указанной в подп. 7.3, оказывающей наибольшее влияние на распределение концентраций ЗВ, рекомендуется отсчет направлений оси факела производить таким образом, чтобы одно из них совпало с направлением от источника на соответствующую форму рельефа.

При расчете максимальных значений долгопериодных средних концентраций ЗВ допускается задавать единое значение поправки на рельеф  $\eta$ , соответствующее наибольшему  $\eta$ , причем максимум определяется по всем возможным сечениям рельефа местности осью факела рассматриваемого источника выброса.

10.5.5. Влияние застройки учитывается в соответствии с п. 9 настоящей главы. При этом в качестве масштаба длины  $x_M$  используется

коэффициент  $r_{m0}$ , вычисленный по формуле (131), а построение объединенных ветровых теней для группы зданий проводится с учетом не более одного определяющего здания с наветренной и подветренной сторон.

10.5.6. При необходимости проведения расчета распространения ЗВ от автомагистрали вспомогательную функцию  $G$  в формулах (127), (134а) следует умножить на коэффициент  $s_H$

$$s_H = 0,9327 \cdot t_H^{0,83} - 0,83 \cdot t_H \cdot \exp\left(-\frac{1}{t_H}\right) \text{ при } 0 < t_H \leq 0,2, \quad (138a)$$

$$s_H = \frac{1}{1 + 0,4545 \cdot t_H^{-1} + 0,05974 \cdot t_H^{-2} - 0,00555 \cdot t_H^{-3}} \text{ при } t_H > 0,2, \quad (138б)$$

где

$$t_H = 0,6268 \cdot \lambda \cdot r_p. \quad (139)$$

Использование формул (138а), (138б) и (139) соответствует аппроксимации автомагистрали в виде объемного источника выброса высотой 2 м.

10.5.7. Расчет по формулам (127) – (132б) при  $\eta > 1$  проводится для расстояний  $r_p$ , удовлетворяющих условию (140а) – (140б):

$$r_p \leq l_{pa} \cdot r_{m0}, \quad (140a)$$

где

$$l_{pa} = \frac{k_{pa} - 1}{\ln\left(\frac{1}{\eta^{n'}} \cdot k_{pa}\right)}. \quad (140б)$$

Для расстояний, не удовлетворяющих этому условию, в формулах (127) и (10.24а), (10.24б) принимается  $\eta = 1$ .

10.5.8. При расчете долгопериодных средних концентраций мелкодисперсных аэрозолей, для которых в соответствии с подп. 5.6 принято  $F > 1$ , правую часть формулы (127) следует умножить на безразмерный коэффициент  $\chi_1$ , который вычисляется по формуле (141):

$$\chi_1 = 0,589(u \cdot \lambda \cdot \theta)^{0,45} \cdot \exp[\beta^2 + \ln(I_{1\beta})], \quad (141)$$

где  $\theta$  (с/м) – вспомогательный параметр, определяемый по табл. 1 в зависимости от параметра  $F$ , установленного согласно подп. 5.6.

Таблица 1. Определение вспомогательного параметра  $\theta$ , с/м

$F$	1,5	2,0	2,5	3,0
$\theta$	5,4	2,9	2,0	1,56

$\beta$  – безразмерный аргумент, вычисляемый по формуле (142):

$$\beta = 0,3253 \left[ 1 + 2,5 \cdot \ln \left( \frac{r_{M0}}{r} \right) - 2 \cdot u \cdot \lambda \cdot \theta \right], \quad (142)$$

причем  $r_{M0}$  находится по формуле (131);

$I_{1\beta}$  – зависящий от  $\beta$  безразмерный коэффициент (рис. 13 прил. 7, который при  $\beta \leq 15$  определяется по таблице прил. 6, а при  $\beta > 15$  рассчитывается по следующей формуле (143):

$$I_{1\beta} = 1,7724 \cdot \beta^{-0,55} \text{ при } \beta > 15. \quad (143)$$

Если экспонента в формуле (10.33) превышает  $10^6$ , то она заменяется на  $10^6$ .

10.6. Если недоступны необходимые для расчета долгопериодных средних концентраций функции распределения метеорологических параметров  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$ , а также информация о прочих характеристиках режима, определяющих среднегодовые концентрации метеопараметров, то допускается проводить упрощенный расчет среднегодовых концентраций загрязняющих веществ от одиночного точечного источника выброса по формуле (144)

$$C = 0,1 \cdot c \cdot P/P_0, \quad (144)$$

где  $C$  и  $c$  – соответственно среднегодовая и максимальная разовая (вычисленная с учетом фона) концентрация от одиночного точечного источника выброса в рассматриваемой расчетной точке;

$P$  – среднегодовая повторяемость ветров румба, соответствующего переносу ЗВ от источника выброса в расчетную точку, %;

$P_0$  – повторяемость направлений ветров одного румба при круговой розе ветров (для восьмирумбовой розы ветров  $P_0 = 12,5$  %), %.

При выполнении условия  $P < P_0$  в формуле (144) для соответствующего румба принимается  $P < P_0$ .

С использованием формулы (144) может проводиться упрощенный расчет среднегодовых концентраций от совокупности точечных источников выброса, а также с учетом соотношений (122), (123) и (124) от линейного и площадного источников выброса. Упрощенный расчет не допускается при вычислении фоновых концентраций по формулам,

приведенным в прил. 4, а также стандартных отклонений и коэффициентов вариации долгопериодных средних концентраций. Результаты упрощенного расчета среднегодовых концентраций дают их оценку сверху и соответственно не могут использоваться для корректировки расчетов долгопериодных средних концентраций, выполненных по формулам, приведенным в подп. 10.1 – 10.5.

## **11. Метод учета фоновых концентраций загрязняющих веществ при расчетах загрязнения атмосферного воздуха и определение фона расчетным путем [1]**

11.1. Если при расчетах загрязнения атмосферного воздуха учтены (т. е. заданы своими высотами, значениями мощности выброса и другими характеристиками) не все источники выброса ЗВ, то результаты расчета должны быть откорректированы, чтобы обеспечить учет вклада в суммарную концентрацию фоновых, т. е. неучтенных, источников.

При наличии требуемых данных обо всех источниках выброса количественный вклад не включенной непосредственно в расчеты части источников выбросов может быть учтен путем проведения сводного расчета загрязнения атмосферного воздуха с совместным использованием информации как о рассматриваемых (уже учитываемых в расчете), так и о фоновых источниках выброса (т. е. всех, кроме рассматриваемых, источниках выброса, создающих загрязнение атмосферного воздуха в промышленном районе, городе или другом населенном пункте).

Учет вклада фоновых источников выброса может быть также обеспечен путем добавления значений фоновой концентрации к результатам расчета загрязнения атмосферного воздуха выбросами от учтенных источников. При этом фоновые концентрации должны относиться к тому времени осреднения, которому соответствуют результаты расчета, и могут быть как установлены по данным инструментальных измерений (наблюдений), так и определены расчетным путем с использованием формул, приведенных в настоящих Методах. В частности, при расчетах разовых и среднегодовых концентраций ЗВ соответственно используются фоновые разовые  $c_{фр}$  и среднегодовые  $c_{фг}$  концентрации рассматриваемых ЗВ, которые соответствуют времени осреднения 20 мин и 1 год.

В случаях, предусмотренных подп. 4.2, допускается использование фоновой концентрации, вычисленной не по отдельным загрязняющим веществам, а совместно по группе ЗВ комбинированного вредного действия.

11.2. Если фоновые концентрации устанавливаются по данным наблюдений для вновь строящихся источника или группы источников выброса (предприятия, объекта группы объектов), то  $c_{\text{фр}}$ , мг/м<sup>3</sup>, определяется как уровень концентраций, превышаемый в 5 % регулярных наблюдений за разовыми концентрациями ЗВ, а  $c_{\text{фг}}$ , мг/м<sup>3</sup>, определяется как среднегодовая концентрация ЗВ, создаваемая всеми источниками выбросов.

Фоновые концентрации ЗВ устанавливаются единым значением по городу или в случае выявления их существенной изменчивости по территории города дифференцированно по постам. Фоновые концентрации  $c_{\text{фр}}$  ЗВ, относящиеся ко времени осреднения 20 мин, устанавливаются дифференцированно по градам скорости и направления ветра в случаях выявления их существенной изменчивости в зависимости от этих параметров.

При расчетах для действующих и реконструируемых источников выброса используются фоновые концентрации ЗВ  $c'_{\text{фр}}$  и  $c'_{\text{фг}}$ , представляющие собой фоновые концентрации  $c_{\text{ф}}$ , из которых исключен вклад рассматриваемых действующих и реконструируемых источников или группы источников. Исключение вклада выполняется по формулам (145) – (148):

$$c'_{\text{фр}} = c_{\text{фр}} \left( 1 - 0,4 \frac{c}{c_{\text{фр}}} \right) \text{ при } c \leq 2 \cdot c_{\text{фр}}, \quad (145)$$

$$c'_{\text{фр}} = 0,2 \cdot c_{\text{фр}} \text{ при } c > 2 \cdot c_{\text{фр}}, \quad (146)$$

$$c'_{\text{фг}} = c_{\text{фг}} - C_{\text{г}} \text{ при } C_{\text{г}} < 0,8 \cdot c_{\text{фг}}, \quad (147)$$

$$c'_{\text{фг}} = 0,2 \cdot c_{\text{фг}} \text{ при } C_{\text{г}} > 0,8 \cdot c_{\text{фг}}, \quad (148)$$

где  $c$  – максимальная разовая, а  $C_{\text{г}}$  среднегодовая расчетная концентрация ЗВ от рассматриваемых источников выброса, определенная по формулам, приведенным в п. 10 настоящей главы, при параметрах выброса, относящихся к периоду времени, за который, по данным наблюдений, определялась фоновая концентрация ЗВ  $c_{\text{ф}}$ .

Концентрация ЗВ  $c$  определяется в точке размещения поста, для которого устанавливалась  $c_{\phi}$ .

11.3. Для ЗВ, по которым данные регулярных наблюдений за состоянием и загрязнением атмосферного воздуха отсутствуют либо по объему и/или качеству не удовлетворяют установленным требованиям, предъявляемым к наблюдениям за фоновым загрязнением атмосферы, и при наличии данных инвентаризации выбросов фоновые концентрации ЗВ  $c_{\phi p}$  и  $c_{\phi r}$  должны определяться на основе сводного расчета загрязнения атмосферного воздуха с использованием формул, приведенных в прил. 4, при условии, что в расчете учитывается не менее 95 % суммарных выбросов от источников, которые расположены на рассматриваемой территории или зона влияния которых пересекается с рассматриваемой территорией. Соблюдение этого условия проверяется по данным государственного учета объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, осуществляемого в соответствии с [5].

Значения максимальной разовой фоновой концентрации загрязняющих веществ для рассматриваемой территории определяются по формуле (149)

$$c_{\phi p} = 0,4 \cdot c, \quad (149)$$

где  $c$  – максимальная расчетная концентрация ЗВ от всей совокупности включенных в расчет источников выброса.

При наличии детальной информации о режимах изменения во времени выбросов и других параметров рассматриваемых источников, в том числе об их суточной, недельной и годовой изменчивости, допускается проводить расчет максимальных разовых фоновых концентраций ЗВ с использованием формул, приведенных в прил. 4.

Значения среднегодовой фоновой концентрации ЗВ для рассматриваемой территории определяются по формуле (150)

$$c_{\phi r} = C_r, \quad (150)$$

где  $C_r$  – среднегодовая концентрация ЗВ, рассчитанная по формулам, приведенным в п. 10 настоящей главы, с применением в расчетах данных, удовлетворяющих требованиям положений подп. 10.2.1 о требованиях к используемым климатическим данным при вычислении долгопериодных средних концентраций.

Исключение вклада рассматриваемых источников выброса при расчетах загрязнения атмосферы (т. е. определение  $c'_\phi$  по рассчитанным  $c_\phi$ ) осуществляется по формулам (145) – (148). Не допускается использование фоновых концентраций, рассчитанных на основе положений данного пункта, для корректировки значений фона, определенных по данным наблюдений, а также для корректировки результатов сводных расчетов (подп. 11.1).

11.4. Для предприятий могут быть рассчитаны также значения максимальных разовых фоновых концентраций  $c'_{\phi\Pi}$  на момент достижения ПДВ (на перспективу) по формулам (151) – (152):

$$c'_{\phi\Pi} = \frac{c'_\phi}{c_M^0 + c'_\phi} \text{ПДК}_{\text{мр}} \quad \text{при } c_M^0 + c'_\phi > \text{ПДК}_{\text{мр}}, \quad (151)$$

$$c'_{\phi\Pi} = \text{ПДК}_{\text{мр}} - c_M^0 \quad \text{при } c_M^0 + c'_\phi \leq \text{ПДК}_{\text{мр}}, \quad (152)$$

где  $c_M^0$  – максимальная концентрация веществ от совокупности источников выброса рассматриваемого предприятия, вычисляемая в соответствии с положениями пп. 5 – 8 настоящей главы при значениях параметров выброса, относящихся к периоду времени, за который определялась фоновая концентрация  $c'_\phi$ .

При отсутствии данных наблюдений концентрацию  $c'_{\phi\Pi}$  для  $i$ -го предприятия ( $i = 1, 2, \dots, N_\Pi$ ) допускается рассчитывать по формуле (153)

$$c'_{\phi\Pi i} = \left[ 1 - \frac{M_i}{\bar{H}_i \sum_{j=1}^{N_\Pi} \frac{M_j}{\bar{H}_j}} \right] \text{ПДК}, \quad (153)$$

где  $N_\Pi$  – число предприятий в городе;

$M_i$  – полная мощность выброса источников на  $i$ -м предприятии, г/с;

$\bar{H}_i$  – средневзвешенная высота источников выброса на  $i$ -м предприятии, м;

$$M_i = M_{(0-10)j} + M_{(11-20)j} + M_{(21-30)j} + \dots; \quad (154)$$

$$\bar{H}_i = \frac{5 \cdot M_{(0-10)j} + 15 \cdot M_{(11-20)j} + 25 \cdot M_{(21-30)j} + \dots}{M_j}; \quad (155)$$

где  $M_{(0-10)j}$ ,  $M_{(11-20)j}$ ,  $M_{(21-30)j}$  и т. д. – суммарные выбросы  $j$ -го предприятия в интервалах высот источников выброса до 10 м включительно, свыше 10 до 20 м включительно, свыше 20 до 30 м включительно и т. д.

Если все источники на  $i$ -м предприятии являются наземными или низкими, т. е. высота выброса не превышает 10 м (выбросы могут быть как организованными, так и неорганизованными), то  $\bar{H}_i = 5$  м.

При использовании значений максимальных выбросов в качестве  $M_i$  и ПДК<sub>мр</sub> в качестве ПДК по формуле (153) вычисляются на момент достижения ПДВ значения максимальной разовой фоновой концентрации, а при использовании среднегодовых выбросов и ПДК<sub>сг</sub> (или ПДК<sub>сс</sub>, если ПДК<sub>сг</sub> не установлены) по формуле (153) вычисляются на момент достижения ПДВ значения среднегодовой фоновой концентрации.

Корректность разработанных с использованием  $c'_{фп}$  нормативов ПДВ проверяется расчетом концентрации по формулам, приведенным в пп. 5 – 8 настоящей главы.

## 12. Методы расчетов рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе от источников выбросов различного типа [1]

12.1. Для расчетов рассеивания выбросов при условии, что температура ГВС  $T_r$  превышает 3000 °С, производится замена рассматриваемого источника на виртуальный с учетом положений, изложенных в подп. 12.2.

Если скорость  $w_0$  выхода струи ГВС из устья источника выброса превосходит скорость звука в атмосферном воздухе  $u_{зв}$ , то расчет рассеивания выбросов также проводится на основе положений, изложенных в подп. 12.2.

Высота устья виртуального источника выброса  $H_v$  определяется соотношением (156)

$$H_v = H + H_d, \quad (156)$$

где  $H_d$  – протяженность динамического участка струи.

Значения  $H_d$  определяются по формулам (157а) – (157б)

$$H_d = [13,5 + 11(Ma - 1)^{1,47}]D \text{ при } 1 \leq Ma \leq 3, \quad (157a)$$

$$H_d = 44 \cdot D \text{ при } Ma > 3, \quad (157b)$$

где  $Ma$  – число Маха, определяемое как отношение  $w_0$  к скорости звука в атмосферном воздухе  $u_{зв}$ ;

$D$  – диаметр устья источника выброса, м.

12.2. Если выполняются условия, изложенные в подп. 12.1, или ограничения на форматы исходных данных не позволяют задать параметры выброса для рассматриваемого источника, то производится замена этого источника выброса на виртуальный таким образом, чтобы для этих источников сохранялись неизменными две следующие характеристики выброса (158) – (159):

$$f_m = w_0^2 \cdot D^2, \quad (158)$$

$$f_b = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot w_0 (T_r - T_a). \quad (159)$$

12.3. При выбросе ГВС, плотность которой  $\rho_r$  меньше плотности атмосферного воздуха  $\rho_v$  на 10 % и более, значение  $f_m$  находится по формуле (160)

$$f_m = w_0^2 \cdot D^2 \frac{\rho_r}{\rho_v}. \quad (160)$$

12.4. В случае факельного горения параметры выброса виртуального источника задаются таким образом, чтобы значение  $f_b$  в формуле (159) удовлетворяло соотношению (161)

$$f_b = \frac{Q(1 - \varepsilon_Q)}{\rho_v \cdot c_{p,v}}, \quad (161)$$

где  $Q$  – тепловая мощность источника выброса, вычисленная с учетом неполноты сгорания топлива;

$\varepsilon_Q$  – часть тепловой мощности источника выброса, затрачиваемая на излучение;

$\rho_v$  – плотность атмосферного воздуха при давлении 1013 гПа и температуре 0 °С, равная 1,29 кг/м<sup>3</sup>;

$c_{p,v}$  – удельная теплоемкость атмосферного воздуха при постоянном давлении.

Тепловая мощность источника выброса вычисляется с использованием данных о теплотворной способности, объемном расходе и полноте сгорания сжигаемых в факеле горючих газов и смесей.

Система единиц, используемая при задании  $c_{p,v}$ , должна соответствовать системе единиц, в которой задается  $Q$ . В частности, для атмосферного воздуха может быть использовано значение  $c_{p,v}$ , равное 1,005 кДж/(кг · К).

12.5. Для точечного источника выброса, оборудованного зонтом или крышкой, параметры выброса виртуального источника задаются таким образом, чтобы обеспечить равенство  $f_b$  значению, рассчитанному по формуле (161), и чтобы при этом для  $f_m$  соблюдалось условие (162)

$$f_m = 0,0001 \text{ м}^4/\text{с}^2. \quad (162)$$

Если плотность выбрасываемой ГВС равна плотности атмосферного воздуха, формула (162) выполняется при  $D = 0,1$  м и  $w_0 = 0,1$  м/с.

12.6. Для точечного источника выброса, ось устья которого отклоняется от вертикали на угол  $\alpha$ , удовлетворяющий условию  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ , параметр  $f_m$  для виртуального источника рассчитывается по формуле (158), в которой вместо  $w_0$  используется значение  $w'_0 = w_0 \cdot \cos(\alpha)$ , а параметр  $f_b$  рассчитывается по формуле (159). Высота виртуального источника определяется через вертикальную проекцию устья источника выброса. Если горизонтальная проекция скорости выбросов  $w'_1 = w_0 \cdot \sin(\alpha)$  превышает 5 м/с, то положение виртуального источника смещается в направлении отклонения оси устья на расстояние  $L_s$ , определяемое по формуле (163) с учетом расчетной скорости ветра:

$$L_s = 5 \cdot d_2 \cdot H \cdot \sin(\alpha), \quad (163)$$

где коэффициент  $d_2$  вычисляется по формулам (108а) – (108б), при расчете по которым вместо  $w_0$  используется  $w'_1$  и принимается  $\Delta T \approx 0$ .

12.7. Для точечного источника выброса, который характеризуется опасной скоростью ветра  $u_m$ , превышающей максимальное расчетное значение, указанное в подп. 5.11, для расчета коэффициентов  $r$  и  $p$  вместо формул (21а), (21б) и (23а) – (23в) используются формулы (164а) – (165г):

$$r = 19,6 \left( \frac{u}{u_m} \right)^{3,3} \left[ 0,67 + 1,67 \frac{u}{u_m} - 1,34 \left( \frac{u}{u_m} \right)^2 \right] \quad (164а)$$

при  $\frac{u}{u_m} \leq 0,15$ ,

$$r = -1185,7 \left( \frac{u}{u_m} \right)^3 + 641,755 \left( \frac{u}{u_m} \right)^2 - 111,769 \frac{u}{u_m} + 6,361 \quad (164б)$$

при  $0,15 \leq \frac{u}{u_m} < 0,2$ ,

$$r = 0,67 \frac{u}{u_m} + 1,6 \left( \frac{u}{u_m} \right)^2 - 1,34 \left( \frac{u}{u_m} \right)^3 \quad (164в)$$

$$\text{при } 0,2 \leq \frac{u}{u_M} \leq 1,$$

$$r = \frac{3(u/u_M)}{2(u/u_M)^2 - \left(\frac{u}{u_M}\right) + 2} \text{ при } \frac{u}{u_M} > 1, \quad (164\Gamma)$$

$$p = 28,8 \text{ при } \frac{u}{u_M} < 1, \quad (165a)$$

$$p = 0,179 \left(\frac{u}{u_M}\right)^{-1,43} \left(1 + 8,43 \left(1 - \frac{u}{u_M}\right)^5\right) \quad (165б)$$

$$\text{при } 0,1 \leq \frac{u}{u_M} < 0,3,$$

$$p = 1 + 8,43 \left(1 - \frac{u}{u_M}\right)^5 \text{ при } 0,3 \leq \frac{u}{u_M} \leq 1, \quad (165в)$$

$$p = 0,32 \frac{u}{u_M} + 0,68 \text{ при } \frac{u}{u_M} > 1. \quad (165г)$$

Значения  $u_M$ , превышающие значения максимальной расчетной скорости ветра, характерны, например, для выбросов в атмосферный воздух ЗВ от газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов. Положения данного пункта не распространяются непосредственно на сверхзвуковые выбросы загрязняющих веществ, которые в процессе адиабатического расширения в атмосфере приобретают отрицательную плавучесть.

12.8. При необходимости произвести расчет рассеивания выбросов ЗВ от воздушных судов, движущихся вдоль траектории  $L$  со скоростью  $v$ , расчет рассеивания выбросов проводится по формуле (62). Если при этом известна тепловая мощность источника выброса  $Q$ , то для учета термического подъема ЗВ используются значения эффективного диаметра  $D_э$  и эффективного перегрева  $\Delta T_э$ , которые рассчитываются по формулам (166) – (167):

$$D_э = 2 \cdot b_{\Pi}, \quad (166)$$

$$\Delta T_э = \frac{Q / (c_{p.B} \cdot \rho_B)}{L \cdot b_{\Pi} \cdot w_{0э}}, \quad (167)$$

где  $b_{\Pi}$  – поперечный размер теплового источника выброса (например, расстояние между крайними двигателями в случае воздушного судна);

$L$  – длина пробега воздушного судна;

$w_{0э} = 0,1$  м/с.

Формулы (166) – (167) при соответствующей корректировке обозначений также применимы при расчетах загрязнения атмосферного воздуха для других случаев движущихся источников выброса, например водного транспорта.

Если горизонтальная составляющая скорости выброса ГВС  $u_0$  превышает 10 м/с, то координаты виртуальных источников смещаются в направлении, противоположном направлению движения самолета, на отрезок длиной  $d_r$ , определяемой по формуле (168):

$$d_r = 0,35(u_0 - 3)D_s, \quad (168)$$

где  $D_s$  – диаметр сопла двигателя.

Для двигателей, скорость выброса ГВС из которых соответствует числу Маха  $Ma > 1$  (где число Маха определяется как отношение скорости выброса ГВС из сопла к  $u_{з.в.}$ ), координаты виртуальных источников дополнительно смещаются в направлении, противоположном направлению движения воздушного судна на отрезок длиной  $S_a$ , определяемой по формулам (169а) – (169б):

$$S_a = (13,5 + 11(Ma - 1)^{1,47})D_s \text{ при } 1 \leq Ma \leq 3, \quad (169a)$$

$$S_a = 44 \cdot D_s \text{ при } Ma > 3. \quad (169b)$$

12.9. При расчете рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе, образующихся при проведении взрывных работ в карьерах, испытательных взрывах, эти выбросы относятся к совокупности виртуальных источников выбросов. При этом та часть возникающего при взрыве пылегазового облака, которая поднимается над бортами карьера более чем на 5 м, представляется в виде расположенного вертикально линейного источника (согласно подп. 8.5), находящегося над тем участком карьера, на котором осуществляется или предусматривается проведение взрывных работ. Выбросы от остальной части пылегазового облака, а также от взорванной горной породы и остальных источников выброса, расположенных внутри карьера, относятся к площадному источнику, располагающемуся на уровне прилегающей к карьере местности. Площадь  $S$ , м<sup>2</sup>, указанного площадного источника выброса соответствует площади  $S_k$  поверхности карьера на указанном уровне. В случае высотных взрывов выбросы представляются в виде объемного источника (согласно подп. 8.8) или, если расстояние до ближайшей к источнику расчетной точки превышает горизонтальный размер объемного источника в 10 раз и более, в виде точечного источника.

12.10. Если при расчете рассеивания выбросов не предусматривается автоматическое вычисление интегралов, которые фигурируют в формулах для концентрации ЗВ от криволинейных, площадных и объемных источников, то допускается представление этих источников в задании на расчет в виде совокупности точечных источников выбросов при условии соблюдения требований к точности вычислений, указанных в настоящих Методах.

12.11. Если параметры выброса источника не удовлетворяют условиям применимости хотя бы одного из методов расчета концентраций, приведенных в пп. 5, 6, 8 – 10 и подп. 12.1 – 12.10 настоящей главы, то при расчетах производится его замена на виртуальный точечный или площадной источник, у которого мощность выброса сохраняется неизменной, высота  $H$  принимается равной 2 м, температура ГВС  $T_r$  задается равной принятой в расчете температуре атмосферного воздуха  $T_b$ , а средняя скорость выхода ГВС из устья источника выброса  $w_0$  принимается равной нулю (подп. 5.8). Положения данного пункта не применяются к источникам, для которых разработаны и утверждены в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, отраслевые (корпоративные) инструкции по подготовке исходных данных для расчетов рассеивания в атмосфере выбросов ЗВ по формулам, приведенным в пп. 5, 6, 8 – 10 и подп. 12.1 – 12.10 настоящей главы.

12.12. Для ЗВ, по которым установлены максимальные разовые, среднесуточные и среднегодовые ПДК [6], среднесуточные концентрации  $c_{cc}$  ЗВ определяются по формуле (170):

$$c_{cc} = c_{m.p}^{0,6} \cdot C_{сг}^{0,4}, \quad (170)$$

где  $c_{m.p}$  и  $C_{сг}$  – максимальная разовая и среднегодовая концентрации ЗВ, рассчитанные по формулам, приведенным в настоящих Методах.

12.13. Расчетное обоснование размеров санитарно-защитной зоны.

Требования к размеру санитарно-защитных зон (СЗЗ) и основания для пересмотра этих размеров регламентируются [7].

Необходимость обоснования ориентировочного размера СЗЗ расчетами ожидаемого загрязнения атмосферного воздуха с учетом фона

регламентирована требованиями санитарных правил. Расчеты ожидаемого загрязнения атмосферного воздуха по формулам, приведенным в настоящих Методах, необходимо проводить для ЗВ и групп веществ комбинированного вредного действия, по которым объект является источником воздействия на среду обитания и здоровье человека.

По ЗВ, для которых установлены значения максимальных разовых, среднесуточных и среднегодовых ПДК, расчетные концентрации сопоставляются с ПДК, относящимися к тому же времени осреднения.

Для ЗВ, по которым среднегодовые ПДК не установлены, расчетные максимальные разовые концентрации сопоставляются с максимальными разовыми ПДК, а расчетные среднегодовые концентрации сопоставляются со среднесуточными ПДК.

Для ЗВ, по которым установлены только среднесуточные ПДК, проводится только расчет среднегодовых концентраций, которые сопоставляются со среднесуточными ПДК.

Для каждого ЗВ и группы веществ комбинированного вредного действия по результатам расчетов, проведенных при соответствующих временах осреднения, определяется предварительное положение границы СЗЗ, на которой должны соблюдаться установленные гигиенические нормативы. Окончательная расчетная граница СЗЗ определяется как огибающая всех предварительных границ.

Для предприятий I и II класса опасности положение этой границы корректируется в соответствии с законодательством Российской Федерации в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения с тем, чтобы на границе СЗЗ обеспечить величины приемлемого риска для здоровья населения.

### **Контрольные вопросы**

1. Раскройте понятие ГВС.
2. Что представляет собой ПДВ?
3. Охарактеризуйте понятие ПДК.
4. Перечислите виды ПДК.

5. Раскройте понятие ПДК<sub>м.р.</sub>
6. Что представляет собой ПДК<sub>сс</sub>?
7. Охарактеризуйте понятие ПДК<sub>сг.</sub>
8. Чем является СЗЗ?
9. Какими бывают источники выбросов в зависимости от расположения устья источника выброса относительно земли?
10. Что такое ЗВ?
11. В каких единицах измеряется мощность выброса загрязняющих веществ?
12. Какой метод используется при расчетах рассеивания выбросов от дымовых труб, вентиляционных шахт, а также от источников организованного выброса загрязняющих атмосферный воздух веществ?
13. Как называется метод расчета рассеивания выбросов из аэрационного фонаря?
14. Как учитывается влияние рельефа местности на максимальную приземную концентрацию ЗВ от одиночного точечного источника выброса?
15. Какой метод позволяет рассчитывать максимальные разовые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе выбросами групп точечных, линейных и площадных источников выбросов?
16. Какой метод расчета рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух позволяет учитывать влияние застройки территории?

## Глава 2. ВЕНТИЛЯЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ, ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

По способу подачи свежего воздуха в помещение и удаления из него загрязненного вентиляция может быть естественной и механической.

### 2.1. Естественная вентиляция (аэрация) [8]

Естественная вентиляция возникает за счет действия теплового напора (за счет разности плотности  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, теплого воздуха внутри помещения и холодного воздуха снаружи), за счет действия ветрового напора и при совместном действии теплового и ветрового напоров. Аэрация помещений называется **бесканальной**, если она происходит через вентиляционные отверстия в стенах и потолке, и **канальной**, если происходит через каналы в стенах. Канальная аэрация применяется в зданиях небольших объемов, бесканальная – в горячих цехах и помещениях большого объема.

В производственной практике, как правило, встречаются конструктивные варианты зданий с различными расстояниями между нижними (приточными) и верхними (вытяжными) вентиляционными отверстиями. Это помещения (здания) со сплошным верхним перекрытием и перекрытием, в котором имеется аэрационный фонарь или вытяжная шахта (рис. 1).

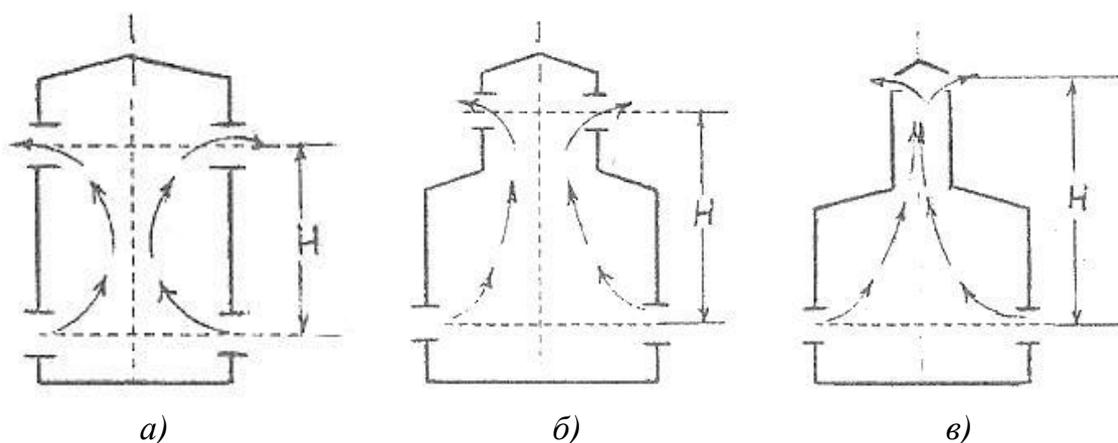


Рис. 1. Производственные помещения: *а* – со сплошным перекрытием; *б* – с аэрационным фонарем; *в* – с вытяжной шахтой

Естественный воздухообмен в производственном помещении возникает под влиянием разности давлений воздуха снаружи и внутри помещения. Разность возникает при действии теплового давления (напора), ветрового давления или при совместном действии ветрового и теплового напоров  $P_v$ ,  $P_t$ . Тепловое давление  $P_t$ , равное произведению расстояния  $H$  между нижними и верхними вентиляционными отверстиями на разность плотности  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, наружного и внутреннего воздуха, будет тем больше, чем больше расстояние  $H$  и разница температур наружного и внутреннего воздуха. Необходимое для аэрации тепловое давление  $P_t$  создается в помещениях, имеющих аэрационный фонарь или вытяжную шахту (устройство шахт экономически невыгодно). Значительное тепловое давление возникает в зимний период года, когда увеличивается разница температур наружного и внутреннего воздуха. Летом, когда разница температур невелика (примерно 5 – 8 °С), тепловое давление в холодных цехах незначительно, и для их аэрации приходится по возможности открывать наибольшее число створок в вентиляционных отверстиях стен и фонарей. В горячих цехах, где выделяется большое количество тепла, даже летом разность температур наружного и внутреннего воздуха бывает значительной, и в этом случае возможна естественная вентиляция.

Естественный воздухообмен возникает в помещениях и под действием ветра. При этом с наветренной стороны помещения создается повышенное давление воздуха, а с заветренной – над кровлей – пониженное давление (разрежение). В результате разницы давлений наружного и внутреннего воздуха с наветренной стороны помещения воздух будет поступать через открытые вентиляционные отверстия, а с заветренной стороны будет выходить через открытые вентиляционные отверстия.

При расчете аэрации помещения необходимо учитывать совместное действие теплового  $P_t$  и ветрового  $P_v$  давлений. При проектировании производственного здания расчет аэрации должен проводиться с учетом метеорологических условий (скорости и направления ветра).

### ***Расчет естественной вентиляции (аэрации) промышленных помещений***

При расчете аэрации однопролетных и многопролетных цехов возможна постановка двух задач:

1. Рассчитать необходимый воздухообмен и требуемые для его осуществления площади вентиляционных отверстий (площади открываемых створок) в стенах и фонаре для производственного помещения (цеха) с известным количеством вредных выделений и количеством избыточного тепла.

2. Рассчитать необходимый воздухообмен и среднюю концентрацию вредных выделений (или среднюю температуру воздуха в рабочей зоне горячего цеха) для производственного помещения (цеха) при известной площади открытых створок вентиляционных отверстий в стенах и фонаре.

Первая задача решается при проектировании производственных зданий, вторая – при проверочных расчетах естественного воздухообмена. Остановимся на решении первой задачи.

**Постановка задачи.** Рассчитать аэрацию однопролетного горячего цеха, имеющего незадуваемый фонарь (рис. 2) при следующих исходных данных:  $W_{изб}$  – количество избыточных тепловыделений, кДж/с;  $t_n$  – температура наружного (приточного) воздуха, °С;  $\Delta t_{рз}$  – избыточная температура воздуха в рабочей зоне (принимается на 3 – 5° выше температуры наружного воздуха в летнее время);  $H$  – расстояние между центрами приточных и вытяжных вентиляционных (аэрационных) отверстий, м;  $h_{рз}$  – высота от уровня пола до плоскости рабочей зоны (принимается 1,5 – 2,0 м);  $v$  – скорость ветра, м/с.

Допущения при расчете: 1) рассчитывать воздухообмен необходимо так, чтобы воздух поровну (или в любых других соотношениях) поступал через вентиляционные отверстия 1, 4 и удалялся через отверстия 2, 3, т. е.  $G_1 = G_4$  и  $G_2 = G_3$  (см. рис. 2); 2) весовые количества воздуха в отверстиях 3 и 4 равны  $G_3 = G_4$ , обозначим отношение  $G_3/G_4 = 1$  через  $a$ ,  $G_3/G_4 = 1 = a$ ; 3) площади вентиляционных отверстий 3 и 4 равны  $F_3 = F_4$ . Обозначим отношение  $F_3/F_4 = 1 = \beta$ .

Расчет аэрации основывается на том, что при установившемся движении масса воздуха, поступающего в цех, равна массе воздуха, выходящего из цеха.

Выражение  $G_{пр} = G_{выт}$  – уравнение баланса воздухообмена.

Для однопролетного цеха, имеющего незадуваемый аэрационный фонарь (см. рис. 2), в котором вентиляционные отверстия 1 и 4 работают на приток, а отверстия 2 и 3 (проемы незадуваемого фонаря) – на вытяжку, уравнение баланса воздухообмена равно  $G_1 + G_4 = G_2 + G_3$ .

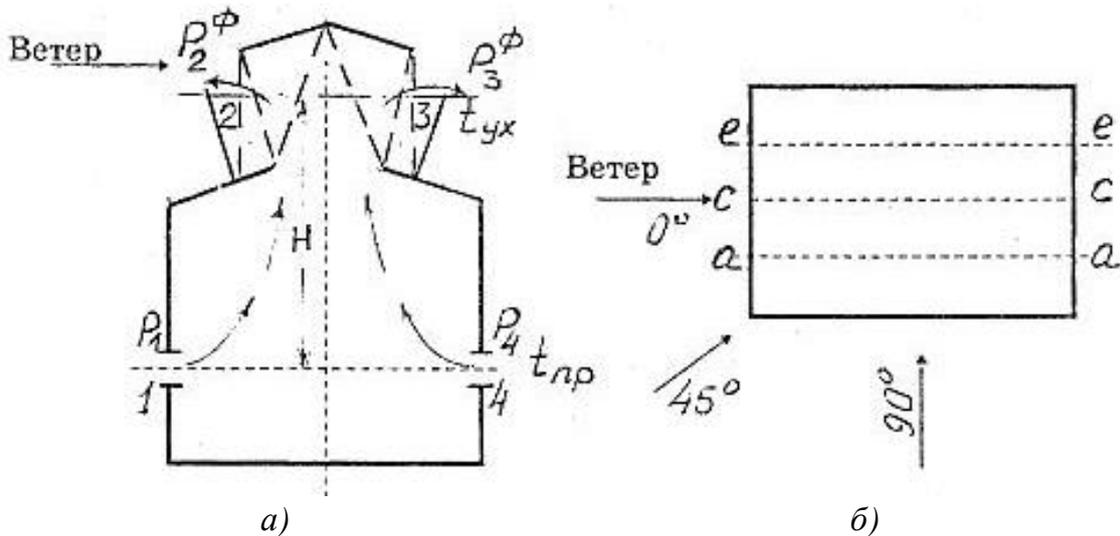


Рис. 2. Схема однопролетного цеха, имеющего незадуваемый аэрационный фонарь: а – в разрезе; б – в плане

В цехах с избыточными тепловыделениями, кроме баланса по воздухообмену, должен поддерживаться и тепловой баланс. Таким образом, в цехе должно соблюдаться равенство между количествами тепла, уносимого воздухом из цеха, и пришедшего с наружным воздухом в цех, плюс избыточное тепло  $W_{изб}$ , выделившееся в цехе за ту же единицу времени.

Масса приточного воздуха  $G_{пр}$ , кг/с, необходимого для ассимиляции (удаления) избытков тепла,

$$G_{пр} = \frac{W_{изб}}{c(t_{yx} + t_{пр})}, \quad (171)$$

где  $W_{изб}$  – количество избыточных тепловыделений в цехе, кДж/с (расчет избыточных тепловыделений приведен в подразд. 2.2.1);

$c$  – удельная теплоемкость воздуха ( $c = 1,0046$  кДж/кг · град);

$t_{yx}$ ,  $t_{пр}$  – температуры уходящего и приточного воздуха, °С.

Температура уходящего из цеха воздуха определяется по формулам:

$$t_{yx} = \frac{3,14W_0^{2/9} \cdot \Delta t_{рз}^{2/3} \cdot h_{рз}^{2/9}}{H^{1/9}} + t_{пр}, \quad (172)$$

$$t_{yx} = t_{рз} + \beta H,$$

где  $W_0$  – количество удельных избыточных тепловыделений, кДж/м<sup>3</sup> · с;

$W_0 = W_{изб}/V$  (где  $V$  – объем помещения, м);

$t_{рз}$  – температура воздуха в рабочей зоне, °С,  $t_{рз} = \Delta t_{рз} + t_{пр}$ ;

$\beta_r$  – температурный градиент, характеризующий изменение температуры воздуха по высоте помещения (для горячих цехов принимается  $\beta_r = 1 - 1,5$ , для помещений небольшой высоты до 2 – 3 м  $\beta_r = 0,2$ ).

Ветер, обдувая помещение, создает на его поверхности положительные и отрицательные давления. Динамическое (ветровое) давление  $P_v$ , Па, в вентиляционных отверстиях  $P_v = (P_{пр}/2)v^2$ , где  $P_{пр}$  – плотность приточного воздуха, кг/м<sup>3</sup>, берется по табл. 4 подразд. 2.2.6;  $v$  – скорость ветра, м/с.

Аэродинамический ветровой коэффициент  $k$  может быть как положительным, так и отрицательным. Зависит это от направления ветра, т. е. от того, как расположено здание по отношению к розе ветров. Знак плюс (+) перед коэффициентом  $k$  означает положительное давление, при этом воздух через вентиляционные отверстия поступает в помещение; знак минус (–) означает разрежение, при этом воздух через вентиляционные отверстия выходит из помещения.

Давления и разрежения  $P$ , Па, создаваемые ветром в вентиляционных отверстиях 1, 4 и 2, 3, равны:

$$\text{в отверстии 1 } P_1 = k_1 P_v;$$

$$\text{в отверстии 2 } P_2 = k_2 P_v;$$

$$\text{в отверстии 3 } P_3 = k_3 P_v;$$

$$\text{в отверстии 4 } P_4 = k_4 P_v.$$

Значения аэродинамических коэффициентов  $k_1, k_2, k_3, k_4$  при заданном направлении движения ветра находятся по табл. 5 подразд. 2.2.6.

При расчете аэрации помещения, имеющего избытки тепла, вводится понятие **фиктивного ветрового давления**. Принимаем, что на уровне середины нижних вентиляционных отверстий 1 и 4 наружное избыточное давление равно нулю, а внутреннее равно  $P_x$  (см. рис. 2), тогда давление в отверстии 1 равно  $0 + P_1 - P_x = P_1 - P_x$  и в отверстии 4  $0 + P_4 - P_x = P_4 - P_x$ .

Внутреннее избыточное давление на уровне середины верхних отверстий 2 и 3, когда за начальный уровень отсчета взято давление  $P_x$  на уровне середины нижних отверстий 1 и 4, равно  $P_x - HgP_{ср}$ , а наружное избыточное давление в отверстии 2  $- P_2 - HgP_{пр}$ , в отверстии 3  $- P_3 - HgP_{пр}$ . Давления в отверстиях 2 и 3, которые работают на вытяжку, равны

$$P_x - HgP_{ср} - (P_2 - HgP_{ср}) \text{ и } P_x - HgP_{ср} - (P_3 - HgP_{ср}) \text{ или}$$

$$P_x + Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}}) - P_2 \text{ и } P_x + Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}}) - P_3.$$

Запишем это выражение в виде

$$P_x - [-Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}}) + P_2] \text{ и } P_x - [-Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}}) + P_3],$$

где выражение вне квадратных скобок, равное  $P_x$ , можно рассматривать как внутреннее давление на уровне отверстий 2 и 3, а в скобках – как внешнее давление на этом же уровне. Выражения  $P_2 - Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}})$  и  $P_3 - Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}})$  рассматриваем как ветровые давления у отверстий 2 и 3, которые при отсутствии источников тепла в цехе обеспечивают такой же воздухообмен, как при совместном действии теплового и ветрового давлений. Поэтому выражения  $P_2 - Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}})$  и  $P_3 - Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}})$  условимся называть фиктивными ветровыми давлениями и обозначим их соответственно  $P_2^\Phi$  и  $P_3^\Phi$ , Па,

$$\text{для отверстия 2 } P_2^\Phi = P_2 - Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}});$$

$$\text{для отверстия 3 } P_3^\Phi = P_3 - Hg(P_{\text{пр}} - P_{\text{ср}}).$$

По табл. 4 подразд. 2.2.6 находим  $P_{\text{ср}}$  для средней температуры воздуха внутри помещения  $t_{\text{ср}} = (t_{\text{рз}} + t_{\text{yx}})/2$ .

Внутреннее давление в цехе  $P_x$  можно менять от  $P_1$  до  $P_2^\Phi$  (или от  $P_4$  до  $P_3^\Phi$ ). Величина  $P_x$  зависит от соотношения площадей открытых створок в вентиляционных отверстиях. Чтобы отверстия 1 и 4 работали на приток, а отверстия 2 и 3 – на вытяжку, внутреннее давление  $P_x$  должно быть меньше  $P_1$  и  $P_4$  и больше  $P_2^\Phi$  и  $P_3^\Phi$ . Внутреннее давление  $P_x$  в цехе, Па,

$$P_x = \frac{a^2 P_4 + \beta^2 P_3^\Phi}{a^2 + \beta^2} \quad (173)$$

Величина  $P_x$  зависит от отношений расходов воздуха  $G_3/G_4 = a$  и площадей открытых вентиляционных проемов  $F_3/F_4 = \beta$ .

Вывод формулы для определения  $P_x$  осуществляется следующим образом: возводятся в квадрат выражения масс воздуха, протекающего через отверстия 3 и 4,  $G_3 = \mu_3 F_3 g \sqrt{2P_{\text{пр}}} \sqrt{P_x - P_3^\Phi}$ ,  $G_4 = \mu_4 F_4 g \sqrt{2P_{\text{пр}}} \sqrt{P_4 - P_x}$ , делится одно выражение на другое, выражения  $g \sqrt{2P_{\text{пр}}}$  и  $g \sqrt{2P_{\text{пр}}}$  сокращаются, так как они примерно равны, и отношение  $\mu_3/\mu_4$  приравнивается к единице. Затем полученное выражение  $\left(\frac{G_3}{G_4}\right) = \left(\frac{F_3}{F_4}\right)^2 \frac{P_x - P_3^\Phi}{P_4 - P_x}$  решается относительно  $P_x$ .

Разность давлений воздуха в вентиляционных отверстиях равна, Па,

$$\text{в отверстии 1 } \Delta P_1 = P_1 - P_x;$$

$$\text{в отверстии 2 } \Delta P_2 = P_x - P_2^\Phi;$$

$$\text{в отверстии 3 } \Delta P_3 = P_x - P_3^\Phi;$$

$$\text{в отверстии 4 } \Delta P_4 = P_x - P_4^\Phi.$$

Площади приточных и вытяжных фрамуг  $F$ , м<sup>2</sup>, находятся из массового расхода воздуха, равного  $G = \mu F g \sqrt{2P} \cdot \sqrt{\Delta P}$ ,

$$\text{для отверстия 1 } F_1 = \frac{G_1}{\mu_1 g \sqrt{2P_{\text{ср}}} \cdot \sqrt{\Delta P_1}};$$

$$\text{для отверстия 2 } F_2 = \frac{G_2}{\mu_2 g \sqrt{2P_{\text{ср}}} \cdot \sqrt{\Delta P_2}};$$

$$\text{для отверстия 3 } F_3 = \frac{G_3}{\mu_3 g \sqrt{2P_{\text{ср}}} \cdot \sqrt{\Delta P_3}};$$

$$\text{для отверстия 4 } F_4 = \frac{G_4}{\mu_4 g \sqrt{2P_{\text{ср}}} \cdot \sqrt{\Delta P_4}};$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода воздуха, зависящий от условий истечения (от способа подвески створок и угла их открывания  $\alpha$ , от отношения высоты створок  $b$  к ее длине  $l$ ;  $\mu$  берется по табл. 6 подразд. 2.2.6;

$g$  – ускорение силы тяжести ( $g = 9,81$  м/с).

## 2.2. Механическая вентиляция [8]

По назначению механическая вентиляция может быть вытяжной, приточной и приточно-вытяжной, по месту действия – общей (общеобменной) и местной.

Система вытяжной механической вентиляции состоит из вытяжных патрубков (насадок), сети воздуховода, аппарата очистки (батареяного циклона) и вытяжного вентилятора.

Система приточной механической вентиляции состоит из воздухозаборного устройства (в виде канала или шахты), калорифера (воздухонагревателя), приточного вентилятора, сети воздухопроводов с приточными патрубками (насадками). Воздухозаборные устройства снабжаются решетками и располагаются у наружных стен здания на уровне кровли или в нижнем этаже, в местах, где воздух меньше всего загрязнен пылью и газами.

Система приточно-вытяжной механической вентиляции – это совокупность двух систем: приточной и вытяжной.

Расчет системы механической вентиляции приточной, вытяжной или приточно-вытяжной сводится к расчету необходимого воздухообмена в помещении, к подбору конфигурации, линейных размеров ( $l, d, F$ ) и расчету сети воздуховодов, к подбору вентиляторов и электродвигателей.

### **2.2.1. Расчет необходимого воздухообмена в производственных помещениях**

Количество воздуха, необходимого для обеспечения требуемых параметров воздушной среды в рабочей зоне, определяется расчетом.

1) Для помещений с тепловыделениями (по избыткам явного тепла) необходимое количество приточного воздуха  $L_{\text{пр}}$  вычисляется по формуле, м<sup>3</sup>/ч,

$$L_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{изб}}}{c p_{\text{пр}} (t_{\text{ух}} - t_{\text{пр}})}, \quad (174)$$

где  $W_{\text{изб}}$  – избыточные тепловыделения, кДж/ч;

$c$  – удельная теплоемкость воздуха;

$p_{\text{пр}}$  – плотность приточного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{\text{ух}}, t_{\text{пр}}$  – температура воздуха, уходящего из помещения, и температура приточного воздуха, °С.

2) Для помещений с пыле-, влаго- и газовыделениями необходимое количество приточного воздуха рассчитывается по формуле, м<sup>3</sup>/ч,

$$L_{\text{пр}} = \frac{K}{K_{\text{ух}} - K_{\text{пр}}}, \quad (175)$$

где  $K$  – количество производственных вредностей (тепла, влаги, пыли), выделяющихся в помещение, г/ч, ( $K$  принимается по данным технологической части проекта, по нормам технологического проектирования либо по данным натурных обследований);

$K_{\text{ух}}, K_{\text{пр}}$  – концентрации вредных выделений удаляемого из помещения и приточного воздуха, г/м<sup>3</sup>.

Предельно допустимые концентрации газов, паров, пыли в воздухе производственных помещений приводятся в [8]. При одновременном выделении в помещениях вредных веществ в виде тепла, влаги, газов, пыли и аэрозолей количество приточного воздуха необходимо определять для каждого вида производственных выделений и принимать в расчете большее.

3) Количество (расход) воздуха, удаляемого (или подаваемого) системой механической вентиляции, при известных скорости потока воздуха  $u$ , м/с, и сечении (диаметре) воздуховода находится по формуле, м<sup>3</sup>/ч,

$$L = 3600Fv. \quad (176)$$

### **2.2.2. Расчет избыточных тепловыделений в производственных помещениях, в зданиях жилого и общественного назначения**

Для создания теплового баланса необходимо, чтобы в помещении тепловыделения  $W$ , кДж/с, равнялись теплопотерям  $W_{\text{п}}$ , кДж/с. Разницу между тепловыделениями и теплопотерями в помещении составляют теплоизбытки  $W_{\text{изб}}$ , кДж/с.

Источниками тепла являются люди (табл. 7 подразд. 2.2.6), источники света, солнечная радиация в производственных помещениях, нагретое оборудование и остывающий металл, ванны с электроподогревом, электропечи, поверхность нагретой воды и водных растворов и т. д.

1. Тепловыделения от источников света  $W = 1000N\eta$ , где 1000 – тепловой эквивалент электрической энергии, кДж на 1 кВт;  $N$  – мощность всех источников света, кВт;  $\eta = 0,92 - 0,97$  – коэффициент перехода электрической энергии в световую.

В производственных помещениях с большими тепловыделениями тепловая энергия, выделяемая людьми и источниками света, не учитывается ввиду их незначительного влияния на общий тепловой баланс.

2. Тепловыделения от солнечной радиации  $W_{\text{рад}}$  (кДж/с),

а) через остекленные поверхности  $W_{\text{рад}}^{\text{ост}} = F_{\text{ост}}q_{\text{ост}}K_{\text{ост}}$ ;

б) через покрытия (ограждения)  $W_{\text{рад}}^{\text{ост}} = F_{\text{п}}q_{\text{п}}K_{\text{п}}$ ,

где  $F_{\text{ост}}$  и  $F_{\text{п}}$  – поверхности остекления или покрытия, м<sup>2</sup>;

$q_{\text{ост}}$  и  $q_{\text{п}}$  – количество радиационного тепла, поступающего в помещение через 1 м<sup>2</sup> поверхности остекления или покрытия, кДж/м<sup>2</sup> · с (табл. 5 пункта 2.2.6);

$K_{\text{ост}}$  – коэффициент, зависящий от характера остекления и степени его загрязнения (табл. 8 подразд. 2.2.6);

$K_{\text{п}}$  – коэффициент теплопередачи покрытия  $K_{\text{п}} < 3,348$  кДж/м<sup>2</sup> · град.

Тепло, поступающее в помещение от солнечной радиации, рассчитывается по двум вариантам:

*1-й вариант* – тепло, поступающее через инсолируемое остекление, расположенное в одной стене, а также через покрытие или фонарь.

*2-й вариант* – берется в расчет 70 % тепла, поступающего в помещение (цех) через остекление двух взаимно перпендикулярных вертикальных ограждений, в сумме с радиацией через покрытие и фонарь.

Из двух вариантов в расчет следует принимать большее количество тепловыделений.

3. Тепловыделения от работающего оборудования – станки и механизмы, снабженные электродвигателями,  $W = 1000\mu N_{уст}$  кДж/с, где  $N_{уст}$  – установочная (номинальная) мощность электродвигателей, кВт;  $\mu = \mu_1/\mu_2$  – коэффициент, равный произведению коэффициента использования установочной мощности  $\mu_1$  на коэффициент загрузки  $\mu_2 = 0,5 - 0,8$ . Для механических и механосборочных цехов при  $N_{уст} = 8$  кВт,  $\mu_1 = 0,26$ , а при  $N_{уст} = 20$  кВт,  $\mu_1 = 0,06$ .

4. Тепловыделения от остывающего металла и других нагретых материалов, кДж/с,

$$W = G_M c_M (t_H - t_K) \beta, \quad (177)$$

где  $G_M$  – масса остывающего металла, кг;

$c_M$  – средняя теплоемкость металла при изменении его температуры от  $t_H$  до  $t_K$ , кДж/кг · град;

$t_H$  и  $t_K$  – начальная и конечная температуры металла (материала), °С;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий неравномерность выделения тепла по времени (для металла при  $G_M < 200$  кг значения  $\beta$  по времени: в 1-й час  $\beta = 0,6 - 0,75$ ; во 2-й час  $\beta = 0,25 - 0,15$ ; в 3-й час  $\beta = 0,15 - 0,1$ ; при  $G_M = 200 - 100$  кг в 1-й час  $\beta = 0,55$ ; во 2-й час  $\beta = 0,3$ ; в 3-й час  $\beta = 0,15$ ). Для других материалов максимальное значение  $\beta = 0,4 - 0,5$ .

5. Тепловыделения от электропечей и ванн с электроподогревом  $W = 1000N_{уст}a\mu$ , кДж/с, где  $N_{уст}$  – установочная мощность печи (ванны), кВт;  $\mu$  – коэффициент одновременности работы печей,  $\mu = 1$ , если в цехе установлено и одновременно работают несколько печей (ванн);  $a$  – тепловыделения в цех в долях  $N_{уст}$  для электропечей  $a = 0,7$ , для электрованн  $a = 0,3$ .

6. Тепловыделения от поверхности нагретой воды и водных растворов

$$W = 1,163(4,9 + 3,5\nu)(t_{\text{воды}} - t_{\text{воздуха}})F, \quad (178)$$

где  $\nu$  – скорость движения воздуха над водой, м/с;

$t_{\text{воды}}$  – температура воды, °С;

$t_{\text{воздуха}}$  – температура воздуха в помещении, °С;

$F$  – поверхность воды, м<sup>2</sup>.

Теплопотери в цехе  $W_{\text{п}}$ , кДж/с, складываются из потерь тепла и тепла, удаляемого из помещения вместе с воздухом местными отсосами  $W_{\text{мо}}$ .

$W_{\text{мо}}$  определяется по формуле, кДж/с,

$$W_{\text{мо}} = cG(t_{\text{рз}} - t_{\text{н}}), \quad (179)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воздуха;

$G$  – количество воздуха, расходуемого в цехе, кг/с;

$t_{\text{рз}}$  – температура воздуха в рабочей зоне, °С (в летний период  $t_{\text{рз}} = t_{\text{пр}} + 3...5$  °С);

$t_{\text{н}}$  – температура наружного воздуха, равная температуре приточного воздуха  $t_{\text{пр}}$ , °С.

В теплый период года, когда температура наружного воздуха  $t_{\text{н}} \geq 10$  °С, теплоизбытки  $W_{\text{изб}}$  в цехе равны, кДж/с,

$$W_{\text{изб}} = \sum W + W_{\text{рад}} - W_{\text{м}} - W_{\text{мо}}. \quad (180)$$

В холодный и переходный периоды года при  $t_{\text{н}} \leq 10$  °С

$$W_{\text{изб}} = \sum W - W_{\text{м}} - W_{\text{мо}},$$

где  $\sum W$  – сумма тепловыделений от всех источников тепла в цехе;

$W_{\text{рад}}$  – тепло, вносимое в помещение солнечной радиацией;

$W_{\text{м}}$  – теплопотери при нагреве материалов, поступающих в цех;

$W_{\text{мо}}$  – тепло, удаляемое из цеха местными отсосами вместе с отработанным воздухом.

### 2.2.3. Расчет сети воздуховодов

Расчет сети воздуховодов сводится к определению потерь давления перемещаемого воздуха в сети воздуховодов.

Возможны два варианта расчета.

1. По заданному расходу воздуха  $L$ , м<sup>3</sup>/ч, и сечению (диаметру) воздуховода определяют скорость движения воздуха  $v$ , м/с, и потери давления в сети воздуховода  $P$ , Па.

2. По заданной скорости движения воздуха в воздуховоде и расходу воздуха определяют сечение (диаметр) воздуховода и потери давлений в воздуховоде.

При расчете потерь давления на участках воздуховода необходимо подбирать сечения (диаметры) воздуховодов и скорости движения воздуха в воздуховоде, основываясь на том, что по мере приближения воздуховода к вентилятору сечение (диаметр) воздуховода и скорость движения воздуха в нем должны возрастать.

Рекомендуемые сечения (диаметры) воздуховодов и скорости движения воздуха в воздуховодах принимаются по табл. 10 подразд. 2.2.6. При этом диаметр воздуховода круглого сечения из листовой стали не должен быть менее  $d = 100$  мм и сечение прямоугольного воздуховода не должно быть менее  $100 \times 150$  мм.

В системе механической вентиляции скорость движения воздуха в воздуховодах основной магистрали (рис. 3) следует принимать от 2 до 10 м/с; в воздуховодах аспирационных установок – в пределах от 10 до 25 м/с. Большие скорости рекомендуются в воздуховодах с относительно гладкой внутренней поверхностью (стальных, фанерных, керамиковых), чем в воздуховодах с шероховатой внутренней поверхностью (бетонных, кирпичных, шлакоалебастровых).

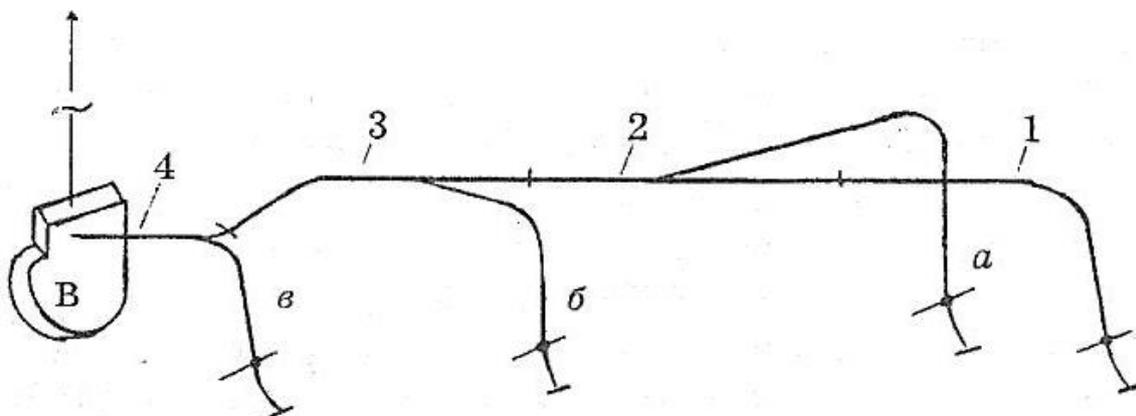


Рис. 3. Система вытяжной механической вентиляции

Система механической вентиляции (см. рис. 3) состоит из основной магистрали воздуховода (участки 1, 2, 3, 4), ответвлений сети воздуховода (участки а, б, в) и вентилятора (В).

Каждый участок воздуховода характеризуется длиной  $l$ , м, расходом воздуха  $L$ , м<sup>3</sup>/ч, поперечным сечением  $F$ , м<sup>2</sup>, диаметром  $d$ , м, и скоростью движения воздуха  $v$ , м/с. К участкам относятся и примыкающие к ним фасонные части (местные сопротивления). Фасонные части – это колена под прямым углом или П-образные отводы круглого или прямоугольного сечения, тройники с круглым или прямоугольным сечением, внезапное расширение или сужение потока воздуха при любых формах сечений воздухопроводов, регулирующие или запорные устройства – задвижки или дроссель-клапаны, диффузоры круглого или прямоугольного сечений и т. д.

Расчет системы вентиляции (сети воздухопроводов) начинается с наиболее удаленного от вентилятора участка (участка 1, см. рис. 3) по всей длине (по всем участкам 1, 2, 3, 4) основной магистрали воздуховода. Для каждого участка определяются расход воздуха  $L$ , м<sup>3</sup>/ч, при заданных сечениях (диаметрах) воздуховода, потери давлений на трение на прямых участках воздухопроводов  $P_{тр}$ , Па, и потери в местных сопротивлениях (фасонных частях воздухопроводов)  $P_{мс}$ , Па. Потери давлений  $P_{тр}$  и  $P_{мс}$  в ответвлениях (а, б, в) не рассчитываются, при этом учитывается только расход воздуха, приходящий из ответвлений в основную магистраль.

Общие потери давлений в сети воздуховода определяются как сумма потерь давлений на трение на прямых участках воздуховода (участки 1, 2, 3, 4)  $P_{тр}$ , Па, и потери давлений в местных сопротивлениях  $P_{мс}$ , Па.

Потери давлений на трение в воздуховодах круглого сечения рассчитываются по формуле, Па,

$$P_{тр} = \frac{\lambda}{d} l \left(\frac{\rho}{2}\right) v^2. \quad (181)$$

Потери давлений в местных сопротивлениях воздухопроводов круглого сечения определяются по формуле, Па:

$$P_{мс} = \sum \xi \left(\frac{\rho}{2}\right) v^2. \quad (182)$$

Общие (суммарные) потери давлений в сети воздуховодов, Па:

$$P_c = \sum_1^h \left( \frac{\lambda}{d} l + \sum \xi \right) \frac{\rho}{2} v^2, \quad (183)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения при ламинарном движении  $\lambda = 64/Re$  в ориентировочных расчетах  $\lambda = 0,02$ ;

$d$  – диаметр воздуховода, м;

$l$  – длина воздуховода, м;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> – для воздуха стандартной плотности);

$v$  – скорость движения воздуха в воздуховоде, м/с;

$\left(\frac{\rho}{2}\right) v^2 = P_d$  – динамическое (скоростное) давление, Па (1 Па = 0,1 кгс/м<sup>2</sup>);

$\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений (коэффициент местных сопротивлений находится по табл. 11 подразд. 2.2.6).

При расчете потерь давлений на трение  $P_{тр}$ , Па, в воздуховодах прямоугольного или квадратного сечения в формулу (181) вместо диаметра круглого сечения  $d$ , м, подставляется эквивалентный диаметр по скорости  $d_v$ , м, или по расходу воздуха  $d_L$ , м.

Эквивалентный диаметр по скорости равен:

– для воздуховодов прямоугольного сечения со сторонами  $a$  и  $b$ :

$$d_v = \frac{2ab}{a+b}. \quad (184)$$

– для воздуховодов квадратного сечения со стороной  $a$

$$d_v = \frac{2a^2}{a+a}. \quad (185)$$

Эквивалентный диаметр по расходу воздуха для воздуховодов прямоугольного сечения со сторонами  $a$  и  $b$  равен

$$d_L = 1,265 \sqrt[5]{\frac{a^3 b^3}{a+b}}. \quad (186)$$

На практике при расчете воздуховодов прямоугольного сечения как наиболее простым пользуются эквивалентным диаметром по скорости воздуха  $d_v$ , м. Потери давлений в местных сопротивлениях (см. рис. 3): участок 1 – колено (или отвод), дроссель-клапан.

В колене потеря давления зависит от  $\alpha$  – угла его поворота, от формы поперечного сечения, соотношения площадей сечений до  $F_0$  и после  $F_1$  поворота (рис. 4, *a*).

В колене под прямым углом  $\alpha = 90^\circ$  можно эффективно снизить потери давлений скруглением внутренней острой кромки на повороте (рис. 4, *б*) или установкой отвода воздуховода.

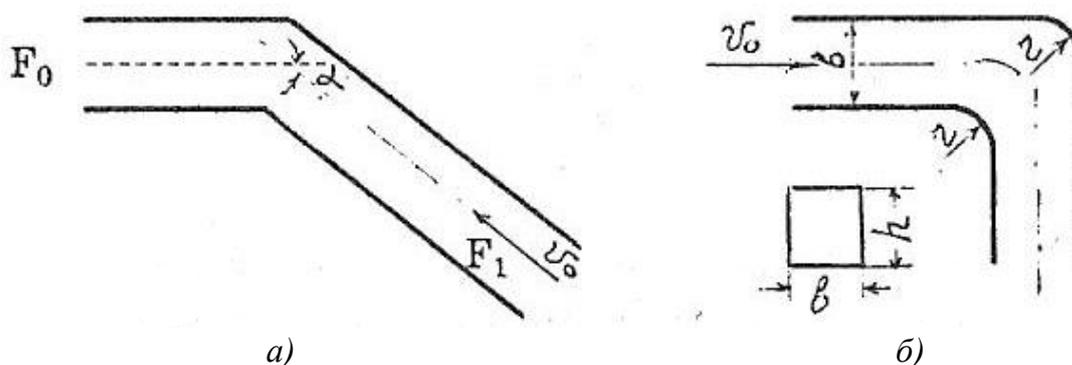


Рис. 4. Колена: *a* – под углом  $\alpha$ ; *б* – с закругленными кромками на повороте

Участок 2 – тройник, расширение потока в вытяжной системе, то же участки 3 и 4 (см. рис. 3). В тройнике потери давлений возникают вследствие вихреобразования при изменении скоростей, сливающихся (в вытяжных тройниках) и разделяющихся (в приточных тройниках) потоков, а также за счет изменения направления движения в ответвлениях. Коэффициенты местных сопротивлений тройников (табл. 12 подразд. 2.2.6) приводятся на боковое ответвление (*б*) и проход (*п*). Проходным считается сечение  $F_{п}$  с меньшим расходом воздуха  $L_{п}$  (в вытяжных тройниках до слияния потока, в приточных – после разделения потока (рис. 5, *a*). Коэффициенты местных сопротивлений тройников могут иметь отрицательный знак, что обуславливается эжекцией струй. Сопротивление тройников можно уменьшить, если скруглить кромки стыка бокового ответвления (рис. 5, *б*) или выполнить ответвления в виде плавного отвода (рис. 6).

Потери давлений в регулирующих (дроссель-клапан) или запорных (задвижка) устройствах (рис. 7) аналогичны потерям давлений на проход, т. е. помимо внезапных расширений и сужений потока происходят еще его повороты. Коэффициенты местных сопротивлений дроссель-клапанов (см. табл. 11 подразд. 2.2.6) зависят от формы воздуховода и угла открывания клапана.

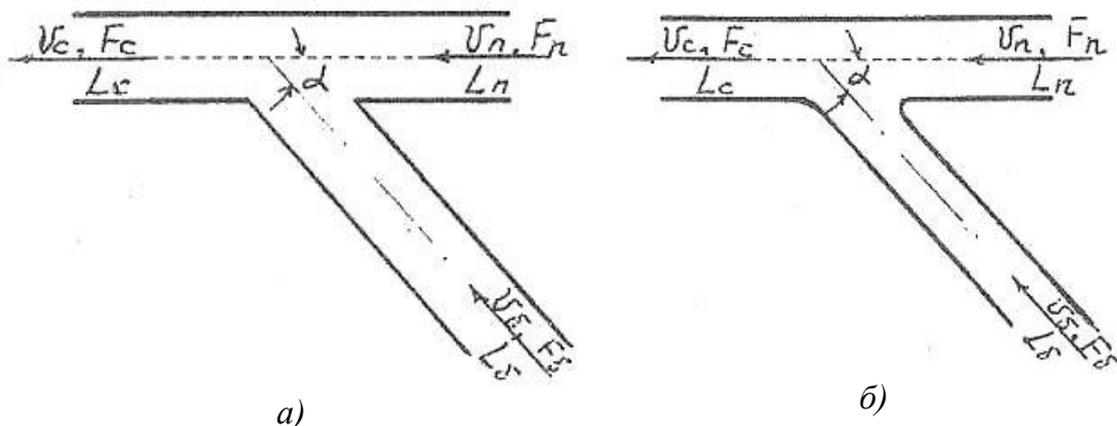


Рис. 5. Тройники: а – с острыми кромками стыков; б – со скругленными кромками стыков

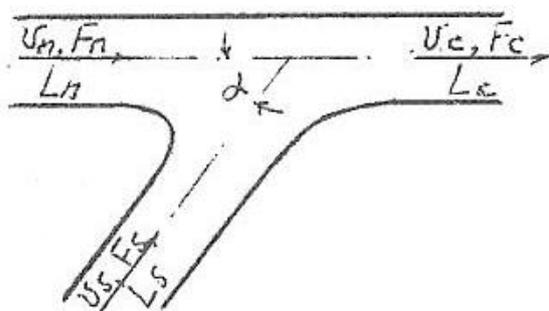


Рис. 6. Тройник с ответвлением в виде плавного отвода

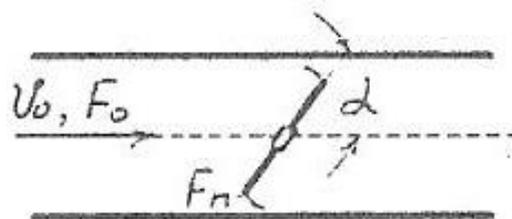


Рис. 7. Дрессель-клапан

Коэффициенты местных сопротивлений при внезапном расширении (рис. 8) или сужении потоков (рис. 9) при любых формах сечений воздухопроводов приводятся в табл. 11.

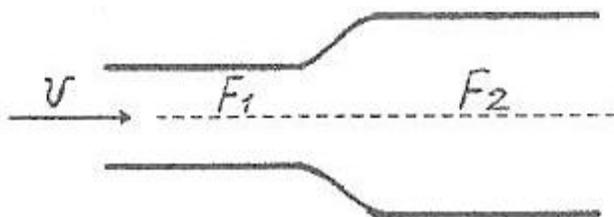


Рис. 8. Внезапное расширение потока (в системе вытяжной вентиляции)

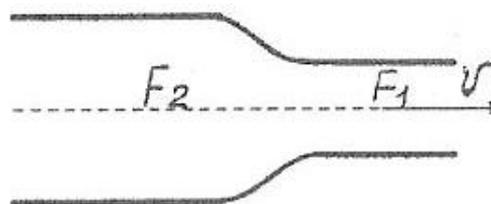


Рис. 9. Внезапное сужение потока (в системе приточной вентиляции)

Потери давления в воздуховоде при плавном его расширении по направлению движения потока следует рассматривать как потерю давления на удар с некоторым его смягчением.

#### **2.2.4. Подбор вентиляторов и электродвигателей**

Для перемещения воздуха по разветвленной сети воздуховодов применяются вентиляторы. Различают осевые и радиальные (центробежные) вентиляторы общего назначения для перемещения воздуха с температурой до 180 °С, не содержащего пыли более 150 мг/м<sup>3</sup> и липких веществ; пылевые – для воздуха, содержащего механические примеси; специальные – для перемещения воздуха с агрессивными средами; дымососы – для дымовых газов и вентиляторы – для взрывоопасных сред. Для перемещения агрессивных и взрывоопасных сред вентиляторы изготавливаются из цветных металлов, винипласта (тип Ц4-68), внутренние поверхности их покрывают защитными пленками. Для свободного отсасывания или нагнетания воздуха в помещение успешно применяются также крышные вентиляторы (типа КЦ-4-84), которые располагаются непосредственно на кровле.

В конструктивном исполнении обычный осевой вентилятор (рис. 10) представляет собой лопаточное колесо 1, расположенное в цилиндрическом кожухе 2. При вращении лопаточного колеса воздух поступает через входное отверстие 3 и перемещается в осевом направлении. Далее воздух поступает в выпускное отверстие 4, снабженное диффузором.

Обычный радиальный (центробежный) вентилятор (рис. 11) представляет собой лопаточное радиальное колесо 1, расположенное в спиральном корпусе (кожухе) 2. При вращении лопаточного колеса воздух поступает через входное отверстие 3 и попадает в каналы между лопатками колеса 4. Под действием центробежной силы воздух перемещается по этим каналам, собирается спиральным кожухом и направляется в его выпускное отверстие 5.

Осевые вентиляторы обладают сравнительно большой производительностью  $L_v$ , м<sup>3</sup>/ч, при небольшом развиваемом давлении ( $P_v < 700$  Па). Серии осевых вентиляторов: ЦАГИ, МЦ, Д, В двух-, трех-, четырехлопастные; У-6, У-12 шести- и двенадцатилопастные; ВО-45 пятилопастные (для жилых помещений) и более совершенные 06-300.

Центробежные вентиляторы применяются в разветвленных вентиляционных установках, в системах пневматического транспорта, в качестве тягодутьевых устройств и т. д. По максимально развиваемому давлению (напору) различают центробежные вентиляторы низкого

давления  $P_B$  до 1000 Па, среднего давления – 1000 – 3000 Па и высокого давления – более 3000 Па. Типы центробежных вентиляторов низкого и среднего давлений ВРН, ВРС; высокого Ц9-57 (№ 3, 4, 5, 6, 8, 16), ЦП7-40 (№ 5, 6, 8), Ц8-18 (№ 9) ЦЧ-70 (№ 2, 5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12,5), Ц4-76 (№ 8, 10, 12,5), Ц14-46 и др. Номер вентилятора определяется по наружному диаметру колеса, дм. Типы вентиляторов и их аэродинамические характеристики приводятся в каталогах для подбора вентиляторов.

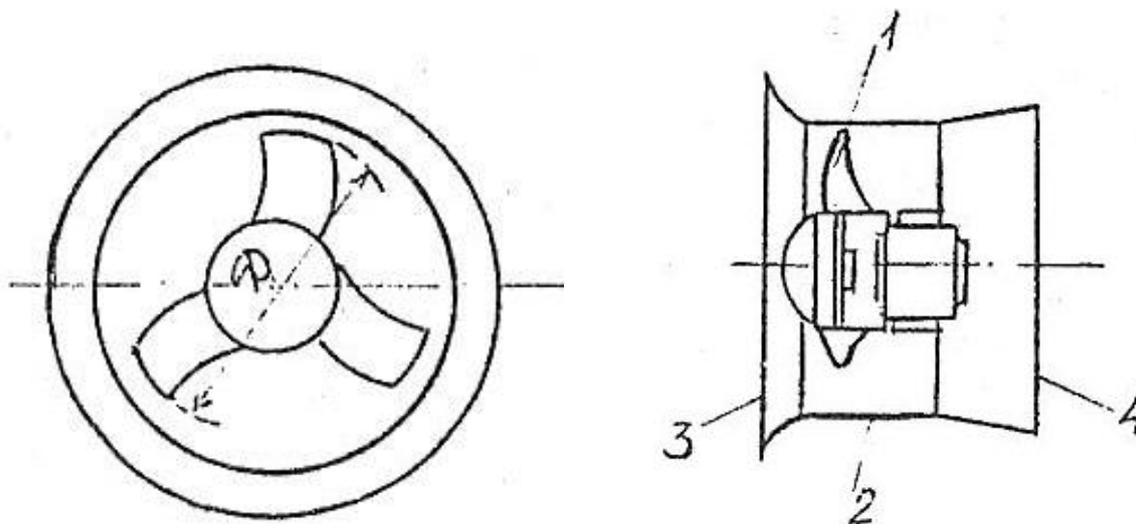


Рис. 10. Схема осевого вентилятора 06-300 № 3, 2

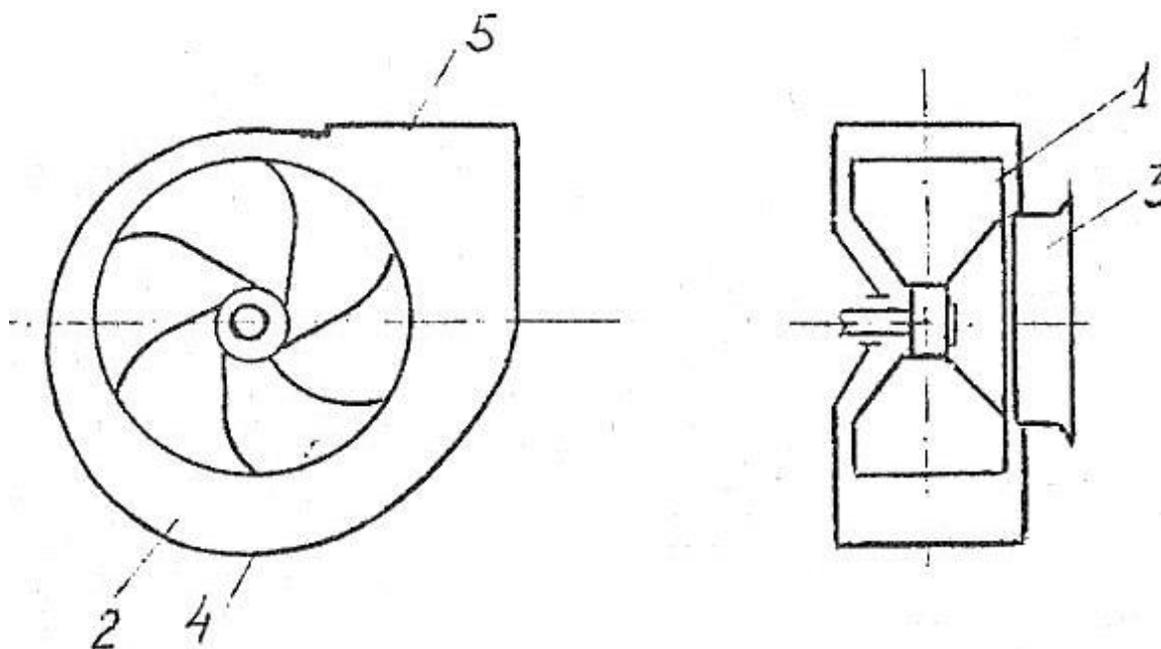


Рис. 11. Схема радиального (центробежного) вентилятора ЦП7-40 № 5

Вентилятор подбирается по основным его параметрам: давлению  $P_B$ , производительности  $L_B$  и условиям перемещаемой среды. Для нормальных условий (если транспортируемый воздух чистый или имеет малую концентрацию пыли и газа) давление, развиваемое вентилятором, равно  $P_B = P_C$ , во всех остальных случаях  $P_B = 1,1P_C$  (где  $P_C$  – суммарные потери напора по всей длине сети воздуховода, Па), производительность вентилятора  $L_B = L_C$ , где  $L_C$  – суммарный расход воздуха в вентиляционной сети с учетом потерь или подсоса воздуха в воздуховоде  $L_B = KL_C$ , где  $K$  – коэффициент, учитывающий потери или подсос воздуха в воздуховоде ( $K = 1,1$  – для стальных, асбестоцементных и пластмассовых воздухопроводов длиной до 50 м;  $K = 1,15$  – в остальных случаях). Определяется  $L_C$  по приведенным в подразд. 2.2.1 формулам ( $L_{пр}$ , м<sup>3</sup>/ч) расчета количества воздуха с учетом тепло-, пыле-, влаго- и газовыделений.

Аэродинамические характеристики вентиляторов, графически отражающие связь между основными параметрами их работы, приводятся в справочниках-каталогах. Основная характеристика вентиляторов – их экономичность, она определяется значением максимального КПД  $\eta$  вентилятора.

При подборе вентилятора наиболее удобны аэродинамические характеристики, построенные в координатах  $P - L$  (рис. 12, 13).

Верхняя кривая  $P - L$  обычно соответствует наибольшей допустимой (по прочности или шуму) частоте вращения  $\omega$ , рад/с, а нижняя кривая определяет условия работы вентилятора без сети при  $L = L_{\max}$ , т. е. при  $P - P_d$ .

При подборе вентилятора на аэродинамической характеристике (рис. 12) отмечается точка (т. А) в соответствии с заданными расчетными значениями  $P_B$  и  $L_B$ . Положение т. А определяет значение частоты вращения ( $\omega = 200$  рад/с) и КПД ( $\eta = 0,5$ ). Если нанесенные кривые режима работы вентилятора не проходят через данную т. А, значения  $\omega$  и  $\eta$  определяются интерполяцией.

Мощность на валу вентилятора  $N$ , кВт, вычисляется по формуле

$$N_B = \frac{L_B P_B}{1000\eta}, \quad (187)$$

где  $L_B$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$P_B$  – давление (напор) вентилятора, Па;

$\eta$  – КПД вентилятора.

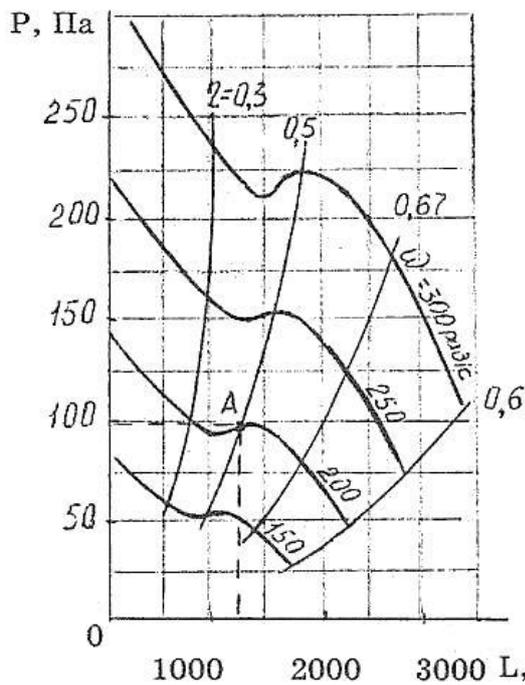


Рис. 12. Характеристика осевого вентилятора 06-300 № 3, 2

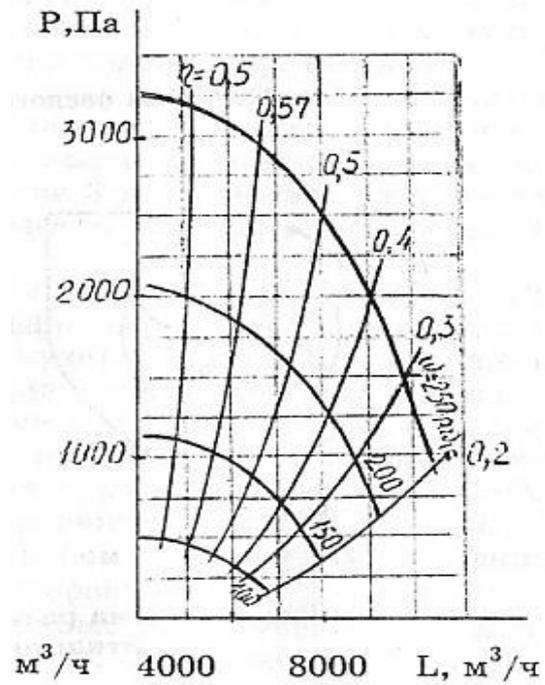


Рис. 13. Характеристика радиального вентилятора ЦП7-40 № 5

Мощность на валу электродвигателя  $N_э$ , кВт, соединенного с вентилятором, рассчитывается по формуле

$$N_э = \frac{L_B P_B}{1000 \eta \eta_n \eta_p} K, \quad (188)$$

где  $L_B$  – производительность вентилятора,  $m^3/c$ ;

$P_B$  – давление (напор) вентилятора, Па;

$\eta$  – КПД вентилятора;

$\eta_n$  – КПД передачи ( $\eta_n = 1,0$  и  $\eta_p = 1,0$ , если вентилятор соединен с двигателем на одном валу);

$\eta_p$  – КПД передачи с учетом потерь в редукторе (при клиноременной передаче  $\eta_p = 0,9 - 0,95$ ; для передач иного типа – фрикционных, зубчатых и других – значения  $\eta_p$  принимаются по справочникам);

$K$  – коэффициент запаса мощности, учитывающий невыявленные расчетом факторы ( $K = 1,1 - 1,15$  для радиальных вентиляторов с лопатками, загнутыми вперед;

$K = 1,05 - 1,1$  для радиальных вентиляторов с лопатками, загнутыми назад и для осевых вентиляторов).

После определения мощности электродвигателя по каталогу подбираются соответствующие типы электродвигателей, у которых установочная мощность на валу  $N_y$  должна быть немного больше расчетной  $N_э$ , т. е.  $N_y > N_э$ .

### Пример расчета

Расчет естественной вентиляции (аэрации)  
промышленных помещений

Исходные данные:

Цех (помещение)	однопролетный
Теплоизбытки в цехе (помещении) $W_{изб}$ , кДж/с	1400
Температура наружного (приточного) воздуха $t_{пр}$ , °С	25
Температура воздуха в рабочей зоне $t_{рз}$ , °С	30
Избыточная температура воздуха в рабочей зоне $\Delta t_{рз}$ , °С	5
Расстояние между центрами вентиляционных фрамуг $H$ , м	8
Скорость ветра $v$ , м/с	4,2
Угол открытия створки фрамуги, °	60
Отношение ширины к длине створки $b/l$	0,5

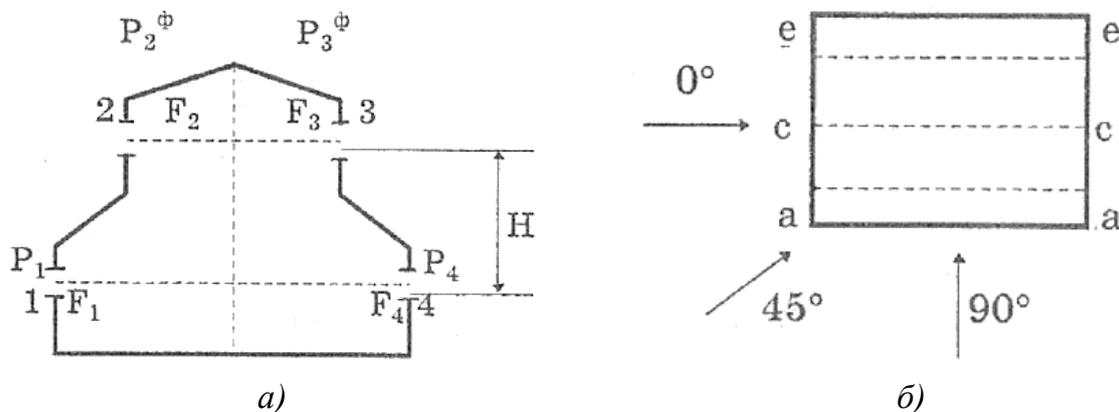


Рис. 14. Аэрационный фонарь: *a* – производственное помещение с аэрационным фонарем (разрез); *б* – сечение в плане

Определить:

1. Давления и разрежения, создаваемые ветром в приточных и вытяжных отверстиях.
2. Площади открытых приточных и вытяжных вентиляционных отверстий (фрамуг).

## Решение

1. Температура уходящего воздуха, °С,

$$t_{yx} = t_{pz} + \beta_r H,$$

где  $\beta_r$  – температурный градиент, характеризующий изменение температуры воздуха по высоте помещения, примем  $\beta_r = 1,5$ ;

$$t_{yx} = 30 + 1,5 \cdot 8 = 42.$$

2. Масса приточного воздуха  $G_{пр}$ , кг/с,

$$G_{пр} = \frac{W_{изб}}{c(t_{yx} - t_{пр})};$$

$$G_{пр} = \frac{1400}{1,0046(42 - 25)} = 82.$$

$G_{пр} = G_{выт}$ , распределяем  $G_{пр}$  и  $G_{выт}$  между отверстиями 1, 4 и 2, 3 поровну (рис. 14).

3. Ветровое (динамическое) давление, Па,

$$P_v = \left(\frac{v_{пр}}{2}\right)^2;$$

$$P_v = \frac{4,2^2 \cdot 1,1185}{2} = 10,45.$$

4. Давления и разрежения, создаваемые ветром, Па: выберем сечение с – с, примем, что ветер имеет направление  $0^\circ$ , тогда по табл. 5 подразд. 2.2.6 находим аэродинамические ветровые коэффициенты  $K_1 = +0,5$ ;  $K_2 = -0,2$ ;  $K_3 = -0,42$ ;  $K_4 = -0,27$ .

$$P_1 = k_1 P_v = 0,50 \cdot 10,45 = 5,22;$$

$$P_2 = k_2 P_v = -0,20 \cdot 10,45 = -2,09;$$

$$P_3 = k_3 P_v = -0,42 \cdot 10,45 = -4,39;$$

$$P_4 = k_4 P_v = -0,27 \cdot 10,45 = -2,82.$$

5. Средняя температура воздуха в помещении  $t_{cp}$ , °С:

$$t_{cp} = \frac{t_{pz} + t_{yx}}{2} = \frac{30 + 42}{2} = 36;$$

для  $t_{cp} = 36$  °С по табл. 4 подразд. 2.2.6  $p_{cp} = 1,142$  кг/м<sup>3</sup>.

6. Фиктивные ветровые давления в отверстиях 2 и 3, Па,

$$P_2^\Phi = P_2 - Hg(p_{пр} - p_{cp}) = -2,09 - 8 \cdot 9,81(1,185 - 1,142) = -5,46;$$

$$P_3^\Phi = P_3 - Hg(p_{пр} - p_{cp}) = -4,39 - 8 \cdot 9,81(1,185 - 1,142) = -7,76.$$

7. Внутреннее давление в цехе  $P_x$ , Па,

$$P_x = \frac{\alpha^2 P_4 + \beta^2 P_3^\Phi}{\alpha^2 + \beta^2} = \frac{1(-2,82) + 1(-7,76)}{1 + 1} = -5,29.$$

8. Разность давлений в приточных 1 и 4 и вытяжных 2 и 3 отверстиях, Па,

$$\Delta P_1 = P_1 - P_x = 5,22 - (-5,29) = 10,51;$$

$$\Delta P_2 = P_x - P_2^\Phi = -5,29 - (-5,46) = 0,17;$$

$$\Delta P_3 = P_x - P_3^\Phi = -5,29 - (-7,76) = 2,47;$$

$$\Delta P_4 = P_4 - P_x = -2,82 - (-5,29) = 2,47.$$

9. Для всех приточных и вытяжных отверстий принимаем одинарную верхнеподвесную створку с углом открытия  $60^\circ$ , отношение ширины к длине створки  $b/l = 0,5$ , тогда коэффициент расхода в створках аэрационных фонарей  $\mu = 0,56$ .

10. Площадь открытых приточных 1, 4 и вытяжных 2, 3 вентиляционных отверстий,  $m^2$ ,

$$F_1 = \frac{G_1}{\mu_1 q \sqrt{2 p_{\text{пр}} \sqrt{\Delta P_1}}} = \frac{41}{0,56 \cdot 9,81 \sqrt{2 \cdot 1,185} \sqrt{10,51}} = 1,5;$$

$$F_2 = \frac{G_2}{\mu_2 q \sqrt{2 p_{\text{пр}} \sqrt{\Delta P_2}}} = \frac{41}{0,56 \cdot 9,81 \sqrt{2 \cdot 1,142} \sqrt{0,17}} = 12,0;$$

$$F_3 = \frac{G_3}{\mu_3 q \sqrt{2 p_{\text{пр}} \sqrt{\Delta P_3}}} = \frac{41}{0,56 \cdot 9,81 \sqrt{2 \cdot 1,142} \sqrt{2,47}} = 3,1;$$

$$F_4 = \frac{G_4}{\mu_4 q \sqrt{2 p_{\text{пр}} \sqrt{\Delta P_4}}} = \frac{41}{0,56 \cdot 9,81 \sqrt{2 \cdot 1,185} \sqrt{2,47}} = 3,1.$$

$$\text{Проверка } \frac{G_3}{G_4} = \frac{41}{41} = 1; \quad \frac{F_3}{F_4} = \frac{3,1}{3,1} = 1.$$

### **2.2.5. Расчет системы местной вытяжной механической вентиляции**

Определить суммарные потери напора по всей сети воздуховода  $P$ , Па, суммарный расход удаляемого воздуха  $L$ ,  $m^3/ч$ , подобрать вентилятор и режим его работы.

В табл. 2 представлены исходные данные для расчета системы местной вытяжной механической вентиляции, на рис. 15 приведена ее схема.

Таблица 2. Расчет системы местной вытяжной механической вентиляции

Исходные данные	Номер участка			
	1	2	3	4
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	690	1400	2300	3500
Длина участка воздуховода, м	8	4,5	10	6
Форма воздуховода	Прямоугольный			
Размер стороны А, м	0,3	0,4	0,45	0,5
Размер стороны В, м	0,4	0,45	0,5	0,55
Число местных сопротивлений:	2	2	3	3
– расширение потока		+	+	+
– сужение потока				
– отвод воздуховода			+	+
– тройник		+	+	+
– дроссель-клапан				
– насадок-конфузор				

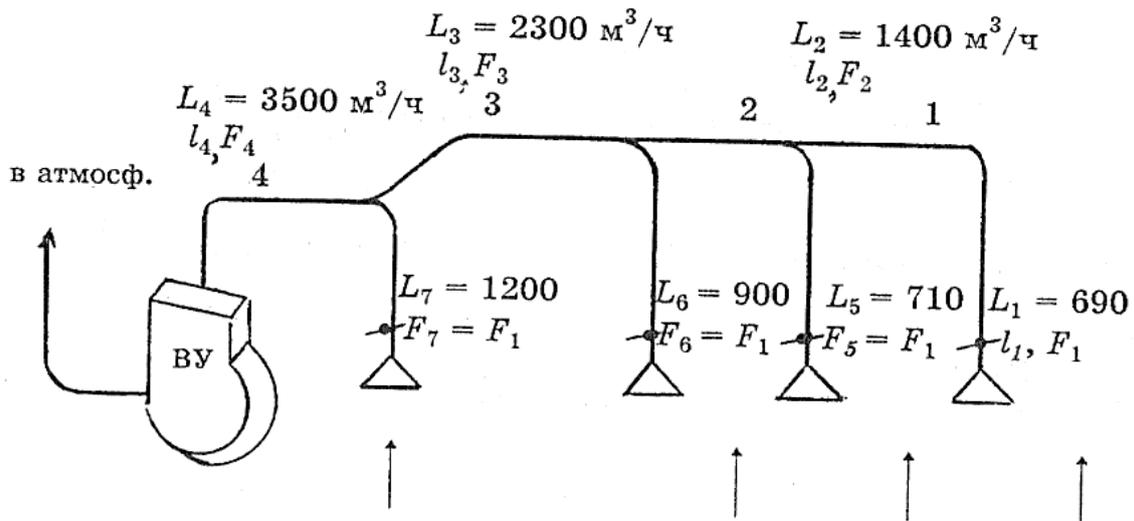


Рис. 15. Расчетная схема местной вытяжной механической вентиляции

**Решение:**

**Участок 1**

Воздуховод прямоугольный сечением  $0,3 \times 0,4 \text{ м}$ .

Эквивалентный диаметр по скорости  $d_{v_1} = (2 \cdot 0,3 \cdot 0,4) / (0,3 + 0,4) = 0,34 \text{ м}$ .

Площадь сечения воздуховода  $F_1 = 0,3 \cdot 0,4 = 0,12 \text{ м}^2$ .

Скорость воздуха в воздуховоде  $v_1 = \frac{L_1}{F_1} = \frac{690}{0,12 \cdot 3600} = 1,6 \text{ м/с}$ .

$$\text{Отношение } \frac{\lambda}{d_{v_1}} = \frac{0,02}{0,34} = 0,059 \text{ 1/м.}$$

Динамическое давление  $P_d = \left(\frac{p}{2}\right) v^2 = \frac{1,2}{2} 1,6^2 = 1,54 \text{ Па}$  (или находим по табл. 10 подразд. 2.2.6). Потери давления на трение

$$P_{\text{тр}_1} = \frac{\lambda}{d_{v_1}} l \frac{p}{2} v^2 = 0,059 \cdot 8 \cdot 1,54 = 0,727 \text{ Па.}$$

Местное сопротивление  $\xi$ :

а) вытяжной насадок прямоугольного сечения ( $\xi$  находим по табл. 11 подразд. 2.2.6)  $F_0/F_t = 0,5$ ;  $\alpha = 20^\circ$ , тогда  $\xi = 0,13$ ;

б) дроссель-клапан, сечение прямоугольное ( $\xi$  находим по табл. 11 подразд. 2.2.6)  $F_n/F_0 = 0,91$ ;  $\xi = 0,28$ .

$$\text{Сумма местных сопротивлений } \sum \xi = 0,13 + 0,28 = 0,41.$$

Потери давления в местных сопротивлениях [9]

$$P_{\text{мс}_1} = \sum \xi \left(\frac{p}{2}\right) v^2 = 0,41 + 1,54 = 0,630 \text{ Па.}$$

Общие потери давлений на участке 1

$$P_1 = P_{\text{тр}_1} + P_{\text{мс}_1} = 0,727 + 0,630 = 1,375 \text{ Па.}$$

## Участок 2

Воздуховод прямоугольный сечением  $0,4 \times 0,45 \text{ м}$ .

$$\text{Эквивалентный диаметр по скорости } d_{v_2} = \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 0,45}{0,4 + 0,45} = 0,42 \text{ м.}$$

$$\text{Площадь сечения воздуховода } F_2 = 0,4 \cdot 0,45 = 0,18 \text{ м}^2.$$

$$\text{Скорость воздуха в воздуховоде } v_2 = \frac{L_2}{F_2} = \frac{1400}{0,18 \cdot 3600} = 2,16 \text{ м/с.}$$

$$\text{Отношение } \frac{\lambda}{d_{v_2}} = \frac{0,02}{0,42} = 0,047 \text{ 1/м.}$$

Динамические давления  $P_d = \left(\frac{p}{2}\right) v^2 = \frac{1,2}{2} \cdot 2,16^2 = 2,8 \text{ Па}$  (или находим по табл. 10 подразд. 2.2.6).

Потери давления на трение  $\xi$

$$P_{\text{тр}_2} = \frac{\lambda}{d_{v_2}} l \frac{p}{2} v^2 = 0,047 \cdot 4,5 \cdot 2,8 = 0,592 \text{ Па.}$$

Местные сопротивления  $\xi$ :

а) расширение потока ( $\xi$  находим по табл. 11 подразд. 2.2.6) при  $F_1/F_2 = 0,12/0,18 = 0,6$  ·  $\xi = 0,16$ ;

б) тройник ( $\xi$  находим по табл. 12 подразд. 2.2.6), пусть  $\alpha = 30^\circ$ ,  $L_6/L_c = 0,5$ ,  $F_6/F_c = 0,12/0,18 = 0,6$ , тогда  $\xi_{c6} = 0,46$ .

$$\text{Сумма местных сопротивлений } \sum \xi = 0,16 + 0,46 = 0,62.$$

Потери давления в местных сопротивлениях  $P_{mc1} = 0,62 \cdot 2,8 = 1,736$  Па.

Общие потери давления на участке 2  $P_2 = P_{тр2} + P_{mc2} = 0,59 + 1,736 = 2,328$  Па.

### Участок 3

Воздуховод прямоугольный сечением  $0,45 \times 0,5$  м.

Эквивалентный диаметр по скорости  $d_{v3} = \frac{2 \cdot 0,45 \cdot 0,5}{0,45 + 0,5} = 0,47$  м.

Площадь сечения воздуховода  $F_3 = 0,45 \cdot 0,5 = 0,225$  м<sup>2</sup>.

Скорость воздуха в воздуховоде  $v_3 = \frac{L_3}{F_3} = \frac{2300}{0,225 \cdot 3600} = 2,84$  м/с.

Отношение  $\frac{\lambda}{d_{v3}} = \frac{0,02}{0,47} = 0,042$  1/м.

Динамическое давление  $P_d = \left(\frac{v}{2}\right) v^2 = \frac{1,2}{2} 2,84^2 = 4,84$  Па.

Потери давления на трение  $P_{тр3} = 0,042 \cdot 10 \cdot 4,84 = 2,032$  Па.

Местное сопротивление  $\xi$ :

а) расширение потока ( $\xi$  находим по табл. 11 подразд. 2.2.6) при  $F_2/F_3 = 0,18/0,225 = 0,8$ ,  $\xi = 0,04$ ;

б) отвод воздуховода прямоугольного сечения  $\xi = 0,79abc$  (находим по табл. 11 подразд. 2.2.6) при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $a = 0,3$ ; при  $R/b = 1,0$ ;  $b = 0,3$ ; при  $a/b = 1,0$ ;  $c = 1,02$ ;  $\xi = 0,79 \cdot 0,3 \cdot 0,3 \cdot 1,02 = 0,07$ ;

в) тройник  $\alpha = 30^\circ$  (находим по табл. 12 подразд. 2.2.6)

$\frac{F_6}{F_{II}} = \frac{0,12}{0,225} = 0,5$ ;  $\frac{L_6}{L_c} = \frac{900}{2300} = 0,4$ , тогда  $\xi_{сб} = 0,5$ .

Сумма местных сопротивлений  $\sum \xi = 0,04 + 0,07 + 0,5 = 0,61$ .

Потери давления в местных сопротивлениях

$P_{mc3} = 0,61 \cdot 4,84 = 2,952$  Па.

Общие потери давлений на участке 3

$P_3 = P_{тр3} + P_{mc3} = 2,032 + 2,952 = 4,984$  Па.

### Участок 4

Воздуховод прямоугольный сечением  $0,5 \times 0,55$  м.

Эквивалентный диаметр по скорости  $d_{v4} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 0,55}{0,5 + 0,55} = 0,52$  м.

Площадь сечения воздуховода  $F_4 = 0,5 \cdot 0,55 = 0,275$  м<sup>2</sup>.

Скорость воздуха в воздуховоде  $v_4 = \frac{L_4}{F_4} = \frac{3500}{0,275 \cdot 3600} = 3,45$  м/с.

Отношение  $\frac{\lambda}{d_{v4}} = \frac{0,02}{0,52} = 0,038$  1/м.

Динамическое давление  $P_d = \left(\frac{p}{2}\right) v^2 = \frac{1,2}{2} 3,54^2 = 7,52$  Па.

Потери давления на трение  $P_{тр4} = 0,038 \cdot 6 \cdot 7,52 = 1,715$  Па.

Местные сопротивления  $\xi$ :

а) расширение потока ( $\xi$  находим по табл. 11 подразд. 2.2.6) при  $F_3/F_4 = 0,225/0,275 = 0,8$ ,  $\xi = 0,04$ ;

б) отвод воздуховода прямоугольного сечения  $\xi = 0,79abc$  (находим по табл. 11 подразд. 2.2.6) при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $a = 0,3$ ; при  $R/b = 1,0$ ;  $b = 0,3$ ; при  $a/b = 1,0$ ;  $c = 1,02$ ;  $\xi = 0,79 \cdot 0,3 \cdot 0,3 \cdot 1,02 = 0,07$ ;

в) тройник  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\frac{F_6}{F_{II}} = \frac{0,12}{0,275} = 0,4$ ;  $\frac{L_6}{L_c} = \frac{1200}{3500} = 0,3$ , тогда  $\xi_{сб} = 0,16$  (находим по табл. 12 подразд. 2.2.6).

Сумма местных сопротивлений  $\sum \xi = 0,04 + 0,07 + 0,16 = 0,27$ .

Потери давления в местных сопротивлениях

$P_{мс4} = 0,27 \cdot 7,52 = 2,03$  Па.

Общие потери давлений на участке 4

$P_4 = P_{тр4} + P_{мс4} = 1,715 + 2,03 = 3,745$  Па.

Суммарные потери напора  $P_c$  находим по формуле (182). Результаты расчета сводим в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета

Номер участка	$L$ , м <sup>3</sup> /ч	$l$ , м	$v$ , м/с	$d_v$ , м	$F$ , м <sup>2</sup>	$P_d$ , Па	$\sum \xi$	$P_{тр}$ , Па	$P_{мс}$ , Па	$P$ , Па
1	690	8	1,6	0,34	0,12	1,54	0,41	0,727	0,63	1,357
2	1400	4,5	2,16	0,42	0,18	2,8	0,62	0,592	1,736	2,328
3	2300	10	2,84	0,47	0,225	4,84	0,61	2,032	2,952	4,984
4	3500	6	3,54	0,52	0,275	7,52	0,27	1,715	2,030	3,745
Вся сеть $L_c = 3500$ м <sup>3</sup> /ч									$P_c = 12,4$ Па	

По справочнику-каталогу подбираем вентилятор по напору (давлению) вентилятора  $P_B = 1,1P_c$ , Па, и по производительности  $L_e > L_c$ , м<sup>3</sup>/ч.

Таким образом, по результатам расчета напор, создаваемый вентилятором в сети, должен быть не менее  $P_B = 1,1 \cdot 12,4 = 13,6$  Па, а производительность вентилятора  $L_e = 3500$  м<sup>3</sup>/ч. Вентилятор должен работать в экономичном режиме и иметь высокий КПД.

Подбираем радиальный вентилятор типа Ц4-70 № 5. На рис. 16 приведена его аэродинамическая характеристика, где точкой А показан режим работы вентилятора в сети. При частоте вращения  $\omega = 100$  рад/с (или частоте вращения двигателя  $n = 960$  мин<sup>-1</sup>), производительности  $L_e = 3500$  м<sup>3</sup>/ч и давлении  $P_B = 380$  Па вентилятор работает при максимальном КПД ( $\eta = 0,8$ ).

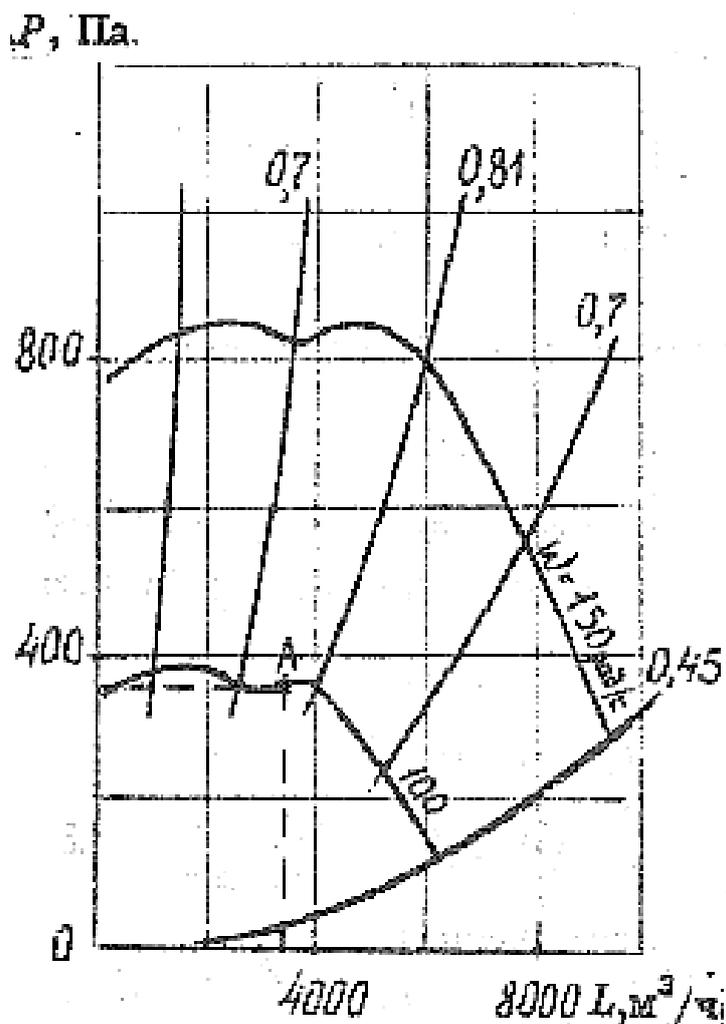


Рис. 16. Аэродинамическая характеристика вентилятора Ц4-70 № 5: т. А – режим работы вентилятора

Расчет мощности на валу электродвигателя  $N_3$ , кВт, и подбор электродвигателя в примере расчета не приводятся.

## 2.2.6. Справочные таблицы

Таблица 4. Плотность воздуха  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, при барометрическом давлении  $P_{\text{бар}} = 760$  мм рт. ст. и различных температурах  $t$ , °С

$t$	$\rho$										
-30	1,453	-15	1,368	0	1,293	+15	1,226	+30	1,165	+45	1,11
-29	1,448	-14	1,363	+1	1,288	+16	1,217	+31	1,161	+46	1,107
-28	1,442	-13	1,358	+2	1,284	+17	1,213	+32	1,157	+47	1,103
-27	1,436	-12	1,353	+3	1,279	+18	1,213	+33	1,154	+48	1,1
-26	1,43	-11	1,348	+4	1,275	+19	1,209	+34	1,15	+49	1,096
-25	1,424	-10	1,342	+5	1,27	+20	1,205	+35	1,146	+50	1,093
-24	1,418	-9	1,337	+6	1,265	+21	1,201	+36	1,142	+51	1,09
-23	1,413	-8	1,332	+7	1,261	+22	1,197	+37	1,139	+52	1,086
-22	1,407	-7	1,327	+8	1,256	+23	1,193	+38	1,135	+53	1,083
-21	1,402	-6	1,322	+9	1,252	+24	1,189	+39	1,132	+54	1,08
-20	1,396	-5	1,317	+10	1,248	+25	1,185	+40	1,128	+55	1,076
-19	1,39	-4	1,312	+11	1,243	+26	1,181	+41	1,124	+56	1,073
-18	1,385	-3	1,308	+12	1,239	+27	1,177	+42	1,121	+57	1,07
-17	1,379	-2	1,303	+13	1,235	+28	1,173	+43	1,117	+58	1,067
-16	1,374	-1	1,298	+14	1,23	+29	1,169	+44	1,114	+59	1,063

Значения аэродинамических ветровых коэффициентов определяются согласно рис. 17.



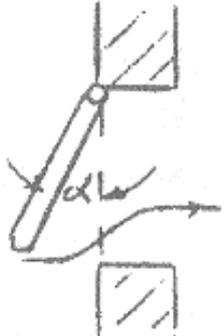
Рис. 17. Значение аэродинамических ветровых коэффициентов  $k$

Таблица 5. Значения аэродинамических коэффициентов  $k$

Эскиз	Сечение цеха в плане	Угол направления ветра, град	Номер открываемых отверстий (фрамуг)							
			1	2	3	4	5	6	7	8
а	$c - c$	0	+0,50	-0,20	-0,42	-0,27				
	$c - c$	45	+0,14	-0,48	-0,74	-0,46				
	$c - c$	90	-0,20	-0,2	-0,2	-0,2				
	$a - a$	90	-0,79	-1,02	-1,02	-0,79				
	$e - e$	90	-0,27	-0,30	-0,30	-0,27				
б	$c - c$	0	+0,47	-0,16	-0,47	-0,42	-0,28	-0,25	-0,26	-0,21
	$c - c$	45	+0,25	-0,64	-0,61	-0,07	-0,37	-0,08	-0,41	-0,21
	$c - c$	90	-0,36	-0,36	-0,59	-0,56	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63
	$a - a$	90	-1,03	-1,28	-1,39	-1,36	-1,50	-1,39	-1,39	-1,50
	$e - e$	90	-0,33	-0,34	-0,38	-0,37	-0,37	-0,35	-0,35	-0,37

Примечание. Знак «+» означает давление, знак «-» – разрежение;  $a - a$ ,  $c - c$ ,  $e - e$  – сечения в плане цеха по центру приточных и вытяжных проемов (фрамуг), находящихся в одной плоскости.

Таблица 6. Значение коэффициентов расхода  $\mu$  в створках аэрационных фонарей

Конструкция створки	Угол открывания $\alpha, ^\circ$	$\frac{b}{l} = 1$	$\frac{b}{l} = \frac{1}{2}$	$\frac{b}{l} = \frac{1}{\infty}$
Одинарная верхнеподвесная	15	0,25	0,22	0,18
	30	0,42	0,38	0,33
Приточная 	45	0,52	0,50	0,44
	60	0,57	0,56	0,53
	90	0,62	0,62	0,62

Окончание табл. 6

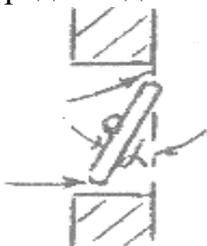
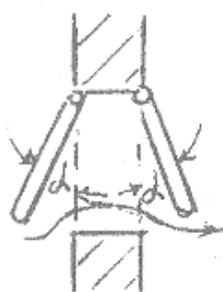
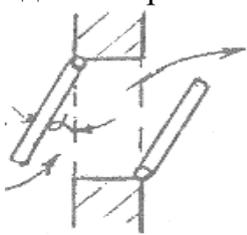
Конструкция створки	Угол открывания $\alpha, ^\circ$	$\frac{b}{l} = 1$	$\frac{b}{l} = \frac{1}{2}$	$\frac{b}{l} = \frac{1}{\infty}$
<p>Одинарная верхнеподвесная вытяжная</p> 	15	0,3	0,24	0,18
	30	0,45	0,38	0,34
	45	0,56	0,5	0,46
	60	0,63	0,57	0,55
	90	0,67	0,63	0,63
<p>Одинарная среднеподвесная приточная</p> 	15	0,15	–	0,13
	30	0,30	–	0,27
	45	0,44	–	0,39
	60	0,56	–	0,56
	90	0,64	–	0,61
<p>Двойная, обе створки на верхнем подвесе – приточная</p>	15	0,26	0,18	–
	30	0,45	0,32	–
	45	0,51	0,44	–
	60	0,58	0,53	–
<p></p>	90	0,65	0,65	–
<p>Двойная, створки на верхнем и нижнем подвесах приточная</p> 	15	0,23	0,15	0,13
	30	0,40	0,30	0,24
	45	0,51	0,41	0,34
	60	0,57	0,50	0,43
	90	0,65	0,6	0,6

Таблица 7. Тепловыделения от людей

Показатель	Количество тепла, кДж/с, выделяемое взрослыми людьми при температуре воздуха в помещении, °С					
	10	15	20	25	30	35
Полное (явное + скрытое) тепло						
1. Работа в состоянии покоя	162	145	116	93	93	93
2. Легкая работа	180	157	151	145	145	145
3. Работа средней тяжести	215	209	203	197	197	197
4. Тяжелая работа	290	290	290	290	290	290

Таблица 8. Тепловыделения от солнечной радиации.

Значения  $q_{ост}$ , кДж/м<sup>2</sup> · с

Характеристика остекленной поверхности	Сторона света и широта											
	Юг			Юго-восток и юго-запад			Восток и запад			Северо-восток и северо-запад		
	45°	55°	65°	45°	55°	65°	45°	55°	65°	45°	55°	65°
Окна с двойным остеклением (две рамы) с деревянными переплетами	145	145	168	127	145	168	145	168	168	75	75	69
То же с металлическими переплетами	186	186	209	162	186	209	186	209	209	93	93	93
Фонарь с двойным вертикальным остеклением (прямоугольный, тип шеда) с металлическими переплетами	186	186	197	162	197	197	186	209	209	98	98	93
То же с деревянными переплетами	168	168	174	174	174	174	168	186	186	87	87	81

Значения  $q_{п}$ , кДж/м<sup>2</sup> · с

Покрытие	Широта	$q_{п}$
Бесчердачное	35°	23
	45°	21
	55°	17
	66°	14
С чердаком	Для всех широт	6

Таблица 9. Значения  $K_{\text{ост}}$

Характеристика	$K_{\text{ост}}$
Двойное остекление в одной раме	1,15
Одинарное остекление	1,45
Обычное загрязнение стекла	0,8
Сильное загрязнение	0,7

В первой горизонтальной строке табл. 10 указаны диаметры  $d$ , мм, во второй – площади поперечных сечений  $F$ , м<sup>2</sup>. В первой колонке таблицы приведены скорости воздуха  $v$ , м/с, во второй – соответствующие динамические давления  $P_d = (p/2)v^2$ , приведенные к стандартному воздуху при  $p = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>, в третьей – расход воздуха  $L^3$ , м<sup>3</sup>/ч, в четвертой – приведенный коэффициент сопротивления трению  $\lambda/d$ , 1/м.

Нормируемые размеры поперечных сечений прямоугольного и квадратного воздуховодов с внутренними размерами, мм: 100 × 150; 100 × 200; 100 × 250; 150 × 200; 150 × 250; 200 × 250; 200 × 300; 200 × 400; 200 × 500; 300 × 400; 300 × 500; 400 × 500; 400 × 600; 500 × 600; 500 × 800; 800 × 1200; 1200 × 1600; 100 × 100; 150 × 150; 200 × 200; 250 × 250; 300 × 300; 400 × 400; 500 × 500; 600 × 600; 800 × 800; 1000 × 1000 и т. д.

Таблица 10. Расчет воздуховодов

$v$ , м/с	$P_d = (p/2)v^2$ , Па	$d$ , мм					
		100		200		280	
		$F$ , м <sup>2</sup>					
		0,00785		0,0314		0,0615	
		$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$
1	0,6	28	0,360	113	0,145	222	0,100
1,5	1,4	42	0,325	170	0,140	332	0,090
2	2,4	56	0,305	226	0,130	443	0,085
3	5,4	85	0,285	339	0,120	665	0,080
4	9,6	113	0,270	452	ОД15	886	0,075
5	15,0	141	0,260	565	0,110	1108	0,075
6	21,6	170	0,250	678	0,105	1329	0,070
7	29,4	198	0,245	791	0,105	1551	0,070
8	38,4	226	0,240	904	0,100	1772	0,070
9	48,5	254	0,235	1017	0,100	1994	0,065
10	60,0	283	0,235	1130	0,100	2216	0,065

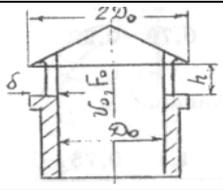
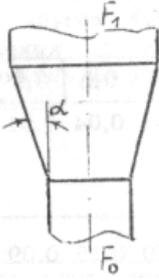
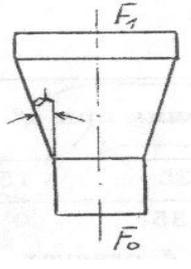
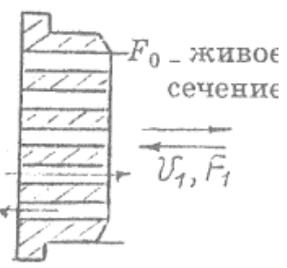
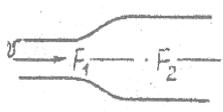
Продолжение табл. 10

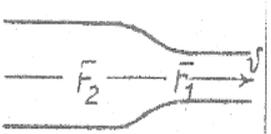
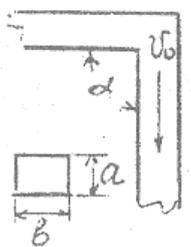
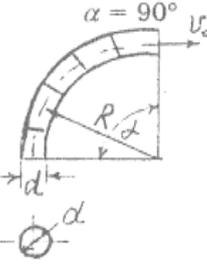
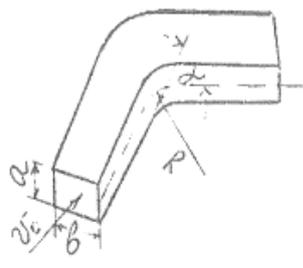
$\nu$ , м/с	$P_d = (p/2)\nu^2$ , Па	$d$ , мм					
		100		200		280	
		$F$ , м <sup>2</sup>					
		0,00785		0,0314		0,0615	
		$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$
12	86,5	339	0,230	1356	0,095	2659	0,065
14	118	396	0,225	1584	0,095	3102	0,060
16	153	452	0,220	1809	0,095	3545	0,060
18	194	509	0,220	2035	0,090	3988	0,060
$\nu$ , м/с	$P_d = (p/2)\nu^2$ , Па	$d$ , мм					
		315		355		400	
		$F$ , м <sup>2</sup>					
		0,083		0,0980		0,114	
		$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$
1	0,6	0,6	0,6	356	0,075	452	0,060
1,5	1,4	1,4	1,4	534	0,065	678	0,055
2	2,4	2,4	2,4	712	0,060	904	0,055
3	5,4	5,4	5,4	1063	0,060	1402	0,050
4	9,6	9,6	9,6	1425	0,055	1809	0,050
5	15,0	15,0	15,0	1781	0,055	2261	0,045
6	21,6	21,6	21,6	2137	0,055	2713	0,045
7	29,4	29,4	29,4	2493	0,050	3165	0,045
8	38,4	38,4	38,4	2849	0,050	3617	0,045
9	48,5	48,5	48,5	3205	0,050	4069	0,045
10	60,0	60,0	60,0	3561	0,050	4522	0,040
12	86,5	86,5	86,5	4274	0,045	5426	0,040
14	118	4170	0,055	4986	0,045	6330	0,040
16	153	4770	0,050	5698	0,045	7235	0,040
18	194	5360	0,050	611	0,045	8139	0,040
$\nu$ , м/с	$P_d = (p/2)\nu^2$ , Па	$d$ , мм					
		450		500		560	
		$F$ , м <sup>2</sup>					
		$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$
		$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$
1	0,6	572	0,050	707	0,045	886	0,040
1,5	1,4	856	0,050	1060	0,045	1329	0,040
2	2,4	1145	0,045	1413	0,040	1772	0,035
3	5,4	1717	0,045	2120	0,040	2659	0,035
4	9,6	2289	0,040	2820	0,035	3545	0,030
5	15,0	2861	0,040	3532	0,035	4431	0,030

Окончание табл. 10

$\nu$ , м/с	$P_d = (p/2)\nu^2$ , Па	$d$ , мм					
		450		500		560	
		$F$ , м <sup>2</sup>					
		$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$
6	21,6	3434	0,040	4239	0,035	5317	0,030
7	29,4	4006	0,040	4945	0,035	6204	0,030
8	38,4	4578	0,035	5652	0,035	7090	0,030
9	48,5	5150	0,035	6359	0,030	7976	0,025
10	60,0	5723	0,035	7065	0,030	8862	0,025
12	86,5	6867	0,035	8478	0,030	10635	0,025
14	118	8012	0,035	9891	0,030	12405	0,025
16	153	9156	0,035	11305	0,030	14180	0,025
18	194	10300	0,035	12715	0,030	15950	0,025
$\nu$ , м/с	$P_d = (p/2)\nu^2$ , Па	$d$ , мм					
		630		710		800	
		$F$ , м <sup>2</sup>					
		$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$	$L$	$\lambda/d$
1	0,6	1122	0,035	1425	0,030	1809	0,025
1,5	1,4	1682	0,035	2137	0,030	2713	0,025
2	2,4	2243	0,030	2849	0,025	3617	0,025
3	5,4	3365	0,030	4274	0,025	5426	0,020
4	9,6	4481	0,025	5698	0,025	7235	0,020
5	15,0	5608	0,025	7123	0,023	9043	0,020
6	21,6	6730	0,025	8548	0,023	10850	0,020
7	29,4	7851	0,025	9972	0,020	12660	0,020
8	38,4	8973	0,025	11395	0,020	14470	0,020
9	48,5	10096	0,025	12820	0,020	16275	0,020
10	60,0	11215	0,025	14245	0,020	18085	0,020
12	86,5	13460	0,020	17095	0,020	21705	0,015
14	118	15705	0,020	19945	0,020	25320	0,015
16	153	17945	0,020	22795	0,020	28940	0,015
18	194	20190	0,020	25645	0,020	32555	0,015

Таблица 11. Коэффициенты местных сопротивлений фасонных частей воздуховодов

Характеристика фасонных частей воздуховодов	Значение $\xi$ , относящееся к $v_0$ при $h/D_0$										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0		
	Приточная										
	2,13	1,3	0,95	0,84	0,75	0,7	0,7	0,63	0,6		
	Вытяжная										
	4	2,3	1,5	1,3	1,18	1,1	1,1	1,05	1,1		
	Диффузор круглого сечения										
	$F_1/F_0 \cdot \alpha^\circ$	5	7	10	15	20					
	0,2	0,12	0,17	0,25	0,13	0,61					
	0,3	0,09	0,13	0,2	0,33	0,42					
	0,4	0,08	0,1	0,15	0,25	0,35					
	0,5	0,06	0,08	0,11	0,18	0,25					
	Диффузор и конфузор произвольного сечения										
	$F_1/F_0$	$\alpha^\circ$									
		14	20	28	40						
	0,2	0,2	0,31	0,49	0,69						
	0,3	0,16	0,24	0,38	0,53						
	0,5	0,09	0,13	0,2	0,28						
Неподвижная жалюзийная решетка	Значение $\xi$ , относящееся к $v_1$ при $F_0/F_1$										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0		
	На входе в прямой канал										
	33	13	6,0	3,8	2,2	1,3	0,79	0,52	0,5		
	На выходе из прямого канала										
	33	14	7,0	4,0	2,5	1,0	1,1	0,75	0,5		
Внезапное расширение потока при любых формах сечения	$\xi$ к $v$ при $F_1/F_2 = 0 - 0,5$										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	1,0	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,09	0,04	0,01	0

Характеристика фасонных частей воздуховодов	Значение $\xi$ , относящееся к $\nu$ при $F_1/F_2 = 0 - 0,5$										
<p>Внезапное сужение потока</p> 	0,5	0,47	0,42	0,38	0,34	0,30	0,25	0,20	0,15	0,09	0
<p>Колено прямоугольного и квадратного сечений</p> 	Значение $\xi$ для квадратного сечения при $\alpha^\circ$										
	$\alpha^\circ$	90	120	135	150						
	$\xi$	1,1	0,55	0,35	0,2						
	При прямоугольном сечении значения $\xi$ следует умножить на $K$										
	Значение $K$										
	$a/b$	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0					
	$K$	1,56	1,0	0,48	0,36	0,34					
<p>Отвод воздуховода круглого сечения</p> 	Значение $\xi$ для круглого сечения										
	$R/d$	0,75	1,0	1,25	1,5	2					
	$\xi$	0,5	0,25	0,2	0,175	0,15					
	Значение $K_1$										
	$\alpha^\circ$	15	30	45	50	60	70	80	100	120	
<p>При других углах <math>\alpha</math> значения <math>\xi</math> следует умножить на коэффициент <math>K_1</math></p>	$K_1$	0,25	0,46	0,63	0,68	0,77	0,86	0,94	1,06	1,15	
<p>Отвод воздуховода прямоугольного сечения</p> 	$\xi = 0,79 \cdot a \cdot b \cdot c$										
	Значение $a$										
	$a$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	
	$a$	0	0,30	0,56	0,77	0,94	1,06	1,16	1,24	1,32	
	Значение $b$										
	$R/b$	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0				
	$b$	0,30	0,20	0,14	0,11	0,10	0,09				
	Значение $c$										
	$a/b$	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0				
	$c$	1,56	1,02	0,48	0,36	0,34	0,33				

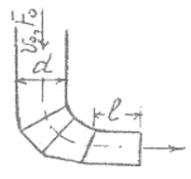
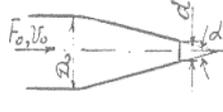
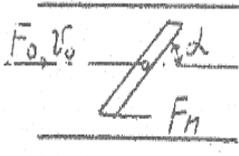
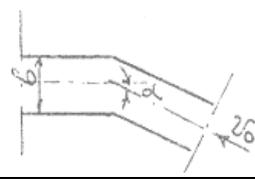
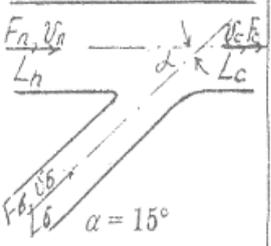
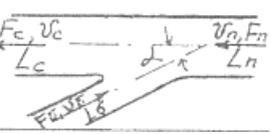
Характеристика фасонных частей воздуховодов	Значение $\xi$ к $v_0$ при $l/d$							
	Приточный насадок в виде составного колена 	$l/d$	0,4			0,3		
$\xi$		1,52			1,41			
Плавно сужающийся насадок (сопло) $A = 7 - 15^\circ$ 	Значение $\xi$ , относящееся к $v_0$ при $d/D$							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	129	41	17	8,2	4,4	2,6	1,6	1,05
Дроссель – клапан 	Сечение круглое							
	$\alpha^\circ$	5	15	30	40	50		
	$\xi$	0,24	0,9	3,9	10,8	32,6		
	Сечение прямоугольное							
	$F_n/F_0$	0,91	0,74	0,5	0,23	0,13		
	$\xi$	0,28	0,77	3,54	24,9	77,4		

Таблица 12. Коэффициенты местных сопротивлений фасонных частей

Характеристика фасонных частей	$\alpha^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	95
Колено круглого, квадратного и прямоугольного сечений 	Воздуховоды любого размера из металла, а также бетонированные и кирпичные при $b \geq 1000$ мм										
	$\xi$	0	0,04	0,1	0,17	0,27	0,39	0,54	0,71	0,89	1,15
	Бетонированные и кирпичные воздуховоды при $b \leq 1000$ мм										
	$\xi$	0	0,04	0,1	0,20	0,33	0,50	0,66	0,85	1,06	1,30

Окончание табл. 12

Характеристика фасонных частей	Боковое ответвление $\xi_{сб}$ при $F_б/F_n$						Проход $\xi_{сп}$ при $F_б/F_n$				
	Вытяжной тройник любого типа   $\alpha = 15^\circ$	$L_б/L_c$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,2	0,4	0,6	0,8
0,1		-2,0	-9,92	-22,1	-38,3	-51,0	-0,09	-0,16	0,21	0,25	0,29
0,2		0,31	-1,17	-3,4	-6,4	-9,7	-0,08	0,15	0,23	0,29	0,33
0,3		0,63	0,11	-0,60	-1,57	-2,65	-0,73	-0,02	0,18	0,27	0,33
0,4		0,71	0,44	0,15	0,24	-0,65	-2,31	-0,43	0,06	1,49	2,64
0,5		0,73	0,54	0,39	0,21	0,13	-5,94	-1,84	-0,70	-0,22	0,03
0,6		0,73	0,57	0,47	0,36	0,30	-14,4	-5,0	-2,32	-1,20	-0,61
0,7		0,73	0,57	0,48	0,41	0,36	-36,8	-13,6	-6,85	-3,89	-2,48
То же, $\alpha^\circ = 30^\circ$	0,1	-2,0	-9,86	-22,0	-38,2	-50,5	0,10	0,16	0,21	0,25	0,30
	0,2	0,33	-1,11	-3,32	-6,28	-9,62	-0,03	0,17	0,25	0,30	0,34
	0,3	0,65	0,16	-0,53	-1,48	-2,55	-0,57	0,05	0,22	0,30	0,35
	Боковое ответвление $\xi_{сб}$ при $F_б/F_n$						Проход $\xi_{сп}$ при $F_б/F_n$				
	$L_б/L_c$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	0,4	0,73	0,50	0,22	-0,15	-0,55	-1,95	-0,39	0,03	0,21	0,31
	0,5	0,75	0,60	0,46	0,29	0,13	-5,11	-1,48	-0,49	-0,08	0,13
	0,6	0,76	0,63	0,54	0,45	0,39	-12,6	-4,18	-1,85	-0,89	-0,38
0,7	0,75	0,63	0,56	0,50	0,46	-32,2	-11,6	-5,70	-3,23	-1,93	
Вытяжной тройник любого типа $\alpha^\circ = 45^\circ$   $\alpha = 45^\circ$	0,1	-1,97	-9,8	-21,9	-38,0	-50,7	0,12	0,17	0,21	0,26	0,30
	0,2	0,38	-1,02	-3,2	-6,14	-9,46	0,05	0,21	0,27	0,31	0,35
	0,3	0,71	0,26	-0,41	-1,34	-2,39	-0,33	0,15	0,28	0,34	0,38
	0,4	0,78	0,59	0,34	-0,01	0,39	1,35	-0,13	0,18	0,31	0,29
	0,5	0,81	0,69	0,58	0,44	0,29	-3,78	-0,91	-0,16	0,14	-0,03
	0,6	0,81	0,72	0,66	0,59	0,55	-9,6	-2,91	-1,11	-0,40	-10,7
	0,7	0,81	0,72	0,68	0,64	0,62	-25,0	-8,48	-3,91	-2,04	-
	То же, $\alpha^\circ = 60^\circ$	0,1	-1,9	-9,6	-21,7	-37,3	-50,5	0,14	0,18	0,22	0,26
0,2		0,45	0,33	-3,04	-5,96	-9,35	0,16	0,26	0,29	0,33	0,36
0,3		0,77	0,37	-0,25	-1,16	-2,18	-0,01	0,29	0,36	0,39	0,42
0,4		0,85	0,71	0,50	0,17	0,18	-0,59	0,19	0,37	0,44	0,47
0,5		0,87	0,81	0,74	0,62	0,50	-2,06	-0,17	0,27	0,43	0,50
0,6		0,88	0,84	0,82	0,77	0,76	-5,72	-1,25	-0,14	0,25	0,44
0,7		0,88	0,84	0,83	0,82	0,83	-15,8	-4,47	1,57	-0,46	0,05

## 2.3. Воздушные завесы

### 2.3.1. Конструктивные требования

Воздушные завесы устраивают в отапливаемых зданиях для обеспечения требуемой температуры воздуха в рабочей (обслуживаемой) зоне и на постоянных рабочих местах, расположенных вблизи ворот, дверей и технологических проемов. Воздушные или воздушно-тепловые завесы (воздушные завесы с подогревом воздуха) могут быть шибберного или смешивающего типа.

Завесы шибберного типа в результате частичного перекрытия проема воздушной струей (шибберующего действия воздушной струи) существенно сокращают прорыв наружного воздуха через открытый проем. Значение коэффициента расхода воздуха через проем при работе завесы становится меньше. В помещение поступает смесь подогретого и холодного наружного воздуха. При этом температура смеси должна быть равна нормативной.

Завесы смешивающего типа не создают дополнительного сопротивления на пути врывающегося наружного воздуха, а осуществляют эффективное смешение его с нагретым воздухом завесы в пределах тамбура.

Воздушные и воздушно-тепловые завесы следует предусматривать [10]:

а) у постоянно открытых проемов в наружных стенах помещений, а также у ворот и проемов в наружных стенах, не имеющих тамбуров и открывающихся более пяти раз или менее чем на 40 мин в смену в районах с расчетной температурой наружного воздуха минус 15 °С и ниже (параметры Б);

б) у наружных дверей вестибюлей общественных и административно-бытовых зданий – в зависимости от расчетной температуры наружного воздуха (параметры Б) и числа людей, проходящих через двери в течение 1 ч при температуре, °С:

минус 15 – минус 25	400 чел. и более
минус 26 – минус 40	250 чел. и более
ниже 45	100 чел. и более

в) при обосновании – у наружных дверей зданий, если к вестибюлю примыкают помещения без тамбура, оборудованные системами кондиционирования;

г) у наружных дверей, ворот и проемов помещений с мокрым режимом;

д) при обосновании – у проемов во внутренних стенах и перегородках производственных помещений для предотвращения протекания воздуха из одного помещения и другое;

е) при обосновании – у ворот, дверей и проемов помещений с кондиционированием или по специальным технологическим требованиям.

Теплоту, подаваемую воздушными завесами периодического действия, не следует учитывать в воздушном и тепловом балансах здания.

Температуру воздуха, подаваемого воздушно-тепловыми завесами, следует принимать не выше 50 °С у наружных дверей и не выше 70 °С у наружных ворот и проемов.

Расчетную температуру смеси воздуха, поступающего в помещение через наружные двери, ворота и проемы, следует принимать не менее, °С,

14 – для производственных помещений при легкой работе;

12 – для производственных помещений при работе средней тяжести и для вестибюлей и административно-бытовых зданий;

8 – для производственных помещений при тяжелой работе;

5 – для производственных помещений при тяжелой работе и отсутствии постоянных рабочих мест на расстоянии 3 м и менее от наружных стен и 6 м и менее – от дверей, ворот и проемов.

Воздушные и воздушно-тепловые завесы у наружных проемов, ворот и дверей рассчитывают с учетом ветрового давления. Расход воздуха определяют, принимая температуру наружного воздуха и скорость ветра при параметрах Б, но не более 5 м/с. Если скорость ветра при параметрах Б меньше, чем при параметрах А, то воздухоподогреватели следует проверять на параметры А. Скорость выпуска воздуха из щелей или отверстий, воздушных или воздушно-тепловых завес следует принимать не более, м/с,

8 – у наружных дверей;

25 – у ворот и технологических проемов.

Завесы шибберного типа, как правило, проектируют с двусторонним выпуском (двусторонние завесы) и komponуют из двух самостоятельных агрегатов, состоящих из радиальных или осевых вентиляторов, калориферов, если завеса воздушно-тепловая, и воздухораспределительных коробов (рис. 18), которые устанавливаются с каждой стороны открываемого проема.

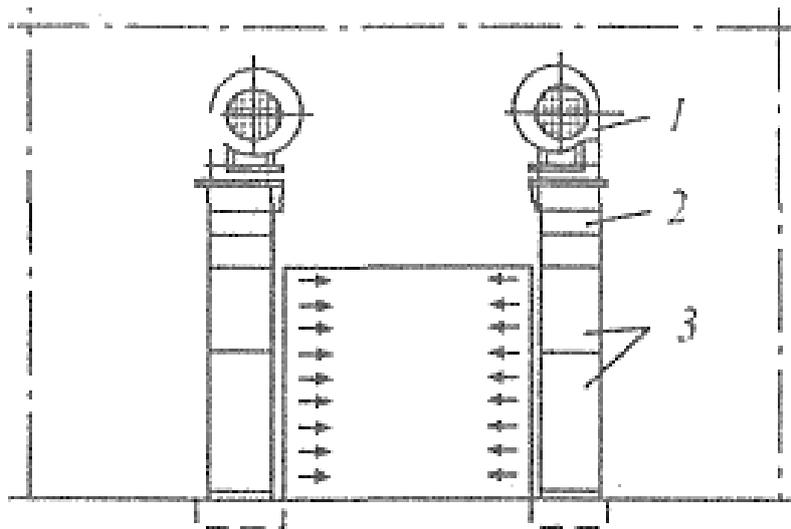


Рис. 18. Двусторонняя воздушно-тепловая завеса шиберного типа:  
1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – воздухораспределительный короб

Воздухораспределительные коробки завес располагают с внутренней стороны проема на расстоянии не более  $0,1F_{\text{пр}}^{1/2}$  (где  $F_{\text{пр}}$  – площадь открываемого проема, оборудованного завесой).

Воздушная струя должна направляться под углом  $30^\circ$  к плоскости проема. Высота воздуховыпускной щели принимается равной высоте открытого проема. Допускается устройство нижних или боковых односторонних завес. Завесы с нижней подачей воздуха рекомендуется применять при ширине проема значительно большей, чем высота. Они наиболее надежно предохраняют нижнюю зону помещений от прорыва холодного воздуха.

Для уменьшения потерь тепла с частью струи завесы, уходящей наружу, рекомендуется (особенно при односторонних завесах) устраивать тамбур. Длина тамбура должна быть не меньше ширины ворот, а ширина – на 1 м больше ширины ворот. Забор воздуха на завесу, как правило, производится под потолком вестибюля.

Основное оборудование воздушных и воздушно-тепловых завес размещают у наружных ворот, дверей.

Для помещений с взрывоопасными производствами должны применяться вентиляторы в искрозащищенном исполнении, а температура теплоносителя для калориферов, через которые проходит рециркуляционный воздух, не должна превышать 80 % значения температуры са-

мовоспламенения газов, паров или пыли. При отсутствии соответствующего искрозащитного оборудования на завесу в помещениях с категориями А, Б допускается забирать наружный воздух или воздух из соседних помещений категорий В, Г и Д, если в нем нет горючей пыли.

При проектировании следует принимать завесы заводского изготовления согласно табл. 13.

Таблица 13. Двусторонние воздушно-тепловые завесы

Шифр завесы	Производительность		Ширина щели, мм	Размер проема ворот, м		Относительная площадь $F = F_{пр}/F_{щ}$
	по воздуху $G$ , кг/ч	по теплу $Q$ , Вт		ширина	высота	
ЗГ.В2-28.01.УЗ.	33600	200000	100	3,6	3,6	18
А5	11300	73700	70	2	2,4	17
				2,4		17
А5-01	18500	173300	70	3	3	21
				3,6		26
ЗВТ1.00.000 ЗВТ2.00.000	28800	232600	90	3	3	17
				3,6		20
ЗВТ1.00.000-01 ЗВТ2.00.000-01	40800	511700	100	3,6	3	18
				3,6		18
ЗВТ1.00.000-02 ЗВТ2.00.000-02	28800	232600	75	3,6	3,6	24
				4,2		28
ЗВТ1.00.000-03 ЗВТ2.00.000-03	40800	511700	90	3,6	3,6	20
				4,2		23
ЗВТ3-1 ЗВТ6-1	39000	368200	150	3,6	4,2	12
				3,6		12
ЗВТ3-2 ЗВТ6-2	41400	423100	150	3,6	4,2	12
				3,6		12
ЗВТ3-3 ЗВТ6-3	43700	481600	150	3,6	3,2	12
				3,6		12
ЗВТ3-4 ЗВТ6-4	44100	383400	150	4,2	4,2	14
				4,2		14
ЗВТ3-5 ЗВТ6-5	52400	522200	150	4,2	4,2	14
				4,2		14
ЗВТ4-1 ЗВТ7-1	55200	619100	150	4,2	4,8	14
				4,2		14
ЗВТ4-2 ЗВТ7-2	56400	498800	150	4,2	4,8	14
				4,2		14

Шифр завесы	Производительность		Ширина щели, мм	Размер проема ворот, м		Относительная площадь $F = F_{\text{пр}}/F_{\text{щ}}$
	по воздуху $G$ , кг/ч	по теплу $Q$ , Вт		ширина	высота	
ЗВТ5-1 ЗВТ8-1	63000	628100	150	4,2	4,8	14
ЗВТ5-2 ЗВТ8-2	67800	746300	150	4,2	4,8	14
ЗВТ5-3 ЗВТ8-3	76900	686500	150	4,8	5,4	16
ЗВТ5-4 ЗВТ8-4	85800	959400	150	4,8	5,4	16
ЗВТ5-5 ЗВТ8-5	91200	1122180	150	4,8	5,4	16

*Примечания.* 1. В таблице приведена суммарная производительность завес (двух установок, располагаемых с обеих сторон проема ворот) при теплоносителе – перегретой воде с параметрами 150 – 170 °С и температуре поступающего в вентилятор воздуха, равной 14 °С. 2. Условные обозначения:  $F_{\text{пр}}$  – площадь открываемого проема, оборудованного завесой;  $F_{\text{щ}}$  – суммарная площадь выпускных щелей.

### 2.3.2. Расчет воздушных завес (завесы шибберного типа)

Общий расход воздуха, подаваемого завесой шибберного типа, определяют по формуле

$$G = 5100q\mu_{\text{пр}}F_{\text{пр}}(\Delta P\rho_{\text{см}})^{1/2}, \quad (189)$$

где  $q$  – отношение расхода воздуха, подаваемого завесой, к расходу воздуха, проходящего в помещение через проем при работе завесы;

$\mu_{\text{пр}}$  – коэффициент расхода проема при работе завесы (табл. 14);

$F_{\text{пр}}$  – площадь открываемого проема, оборудованного завесой, м<sup>2</sup>;

$\Delta P$  – разность давлений воздуха с двух сторон наружного ограждения на уровне проема;

$\rho_{\text{см}}$  – плотность воздуха при температуре  $t_{\text{см}}$ , равной нормативной  $\rho_{\text{см}} = 353/(273 + t_{\text{см}})$ .

Таблица 14. Коэффициенты расхода проемов  $\mu_{пр}$  для завес шибберного типа

Тип завесы	Относительная площадь	Значение $\mu_{пр}$ при относительном расходе воздуха, подаваемого завесой, $q$					
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Боковая	10	0,42	0,38	0,35	0,33	0,31	0,29
		0,36	0,32	0,31	0,28	0,26	0,25
	20	0,35	0,32	0,30	0,29	0,29	0,29
		0,3	0,27	0,26	0,25	0,25	0,25
	30	0,31	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
		0,27	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	40	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Нижняя	10	0,50	0,45	0,40	0,37	0,34	0,31
		0,42	0,38	0,36	0,32	0,30	0,27
	20	0,4	0,35	0,30	0,28	0,25	0,23
		0,34	0,30	0,28	0,25	0,23	0,21
	30	0,35	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20
		0,31	0,26	0,24	0,21	0,20	0,18
	40	0,31	0,27	0,24	0,21	0,20	0,18
		0,27	0,24	0,21	0,19	0,17	0,15

*Примечания:* 1. Первыми приведены значения  $\mu_{пр}$  для раздвижного проема, а вторыми – для распашного. 2. Значения относительного расхода  $q$  и относительной площади  $F$  принимают исходя из технико-экономических соображений. В первом приближении рекомендуется принимать  $q = 0,6 - 0,7$ ;  $F = 20 - 30$ .

Разность давлений  $\Delta P$  определяют расчетом в результате решения уравнений воздушных балансов помещений с учетом ветрового давления для холодного периода года.

Для ориентировочных расчетов, если нет полных исходных данных, значение  $\Delta P$  можно определять по формуле

$$\Delta P = \Delta P_r + k_1 \Delta P_3, \quad (190)$$

где  $k_1$  – поправочный коэффициент на ветровое давление, учитывающий степень герметичности зданий (табл. 15).

Таблица 15. Поправки коэффициента  $K$  на ветровое давление

Здание	$k_1$
Без аэрационных проемов	0,2
С аэрационными проемами, закрытыми в холодный период года	0,5
То же, с открытыми в холодный период года	0,8

$$\Delta P_1 = 9,8h_{\text{расч}}(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}), \quad (191)$$

$$\Delta P_{\text{в}} = cv_{\text{в}}^2 \rho_{\text{н}}/2, \quad (192)$$

где  $h_{\text{расч}}$  – расчетная высота, т. е. расстояние по вертикали от центра проема, оборудованного завесой, до уровня нулевых давлений, где давления снаружи и внутри здания равны (высота нейтральной зоны), м;

$\rho_{\text{н}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup> при температуре наружного воздуха (параметры Б);

$\rho_{\text{в}}$  – то же, при средней по высоте помещений температуре внутреннего воздуха;

$v_{\text{в}}$  – расчетная скорость ветра, значение которой принимается при параметрах Б для холодного периода года;

$c$  – расчетный аэродинамический коэффициент, значение которого следует принимать по [11].

Расчетную высоту  $h_{\text{расч}}$  ориентировочно можно принимать:

а) для зданий без аэрационных проемов и фонарей:

$$h_{\text{расч}} = 0,5h_{\text{пр}},$$

где  $h_{\text{пр}}$  – высота открываемого проема, оборудованного завесой;

б) для зданий с аэрационными проемами, закрытыми в холодный период года:

$$h_{\text{расч}} = h_1 + h_2/(0,25(L_{\text{п}}/L_{\text{в}})^2 + 1),$$

где  $h_1$  – расстояние от центра проема, оборудованного завесой, до центра приточных проемов, м;

$h_2$  – расстояние между центрами приточных и вытяжных проемов, м;

$L_{\text{п}}$  – длина открываемых в теплый период года притворов приточных проемов, м;

$L_{\text{в}}$  – то же, вытяжных проемов, м (для зданий со светоаэрационными или зенитными фонарями, закрытыми в холодный период года).

Усредненные значения  $h_{\text{расч}}$  приведены в табл. 16.

в) для зданий с аэрационными проемами, открытыми в холодный период года:

$$h_{\text{расч}} = h_1 + h_{\text{п}},$$

где  $h_{\text{п}}$  – расстояние от центра открытых приточных аэрационных проемов до уровня нулевого давления.

Таблица 16. Усредненные значения  $h_{\text{расч}}$  для одноэтажных производственных зданий

Высота здания, м	Значение $h_{\text{расч}}$ при размерах проема ворот, м				
	3 × 3	3,6 × 3	3,6 × 3,6	4,2 × 4,2	4,8 × 5,4
7,2	5,6	5,4	4,8	4,1	2,7
	2,9	2,5	2	2,1	2,7
8,4	6,4	6,1	5,6	4,8	2
	3,4	2,9	2,4	2,1	2,7
10,8	7,8	7,6	7	6,1	4
	4,4	3,8	3,2	2,8	2,7
15,6	10,9	10,5	9,8	8,7	6,2
	6,2	5,5	4,8	3,8	2,7

Примечание. Первыми приведены значения  $h_{\text{расч}}$  для зданий со светоаэрационными фонарями, вторыми – для зданий с зенитными фонарями.

Требуемая температура воздуха завесы  $t_3$  определяется на основании уравнения теплового баланса по формуле

$$t_3 = t_{\text{н}} + (t_{\text{см}} + t_{\text{н}})/(q(1 - Q)), \quad (193)$$

где  $Q$  – отношение теплоты, теряемой с воздухом, уходящим через открытый проем наружу, к тепловой мощности завесы (рис. 19).

Для боковых завес значение  $t_3$  может быть определено с помощью номограммы, приведенной на рис. 20.

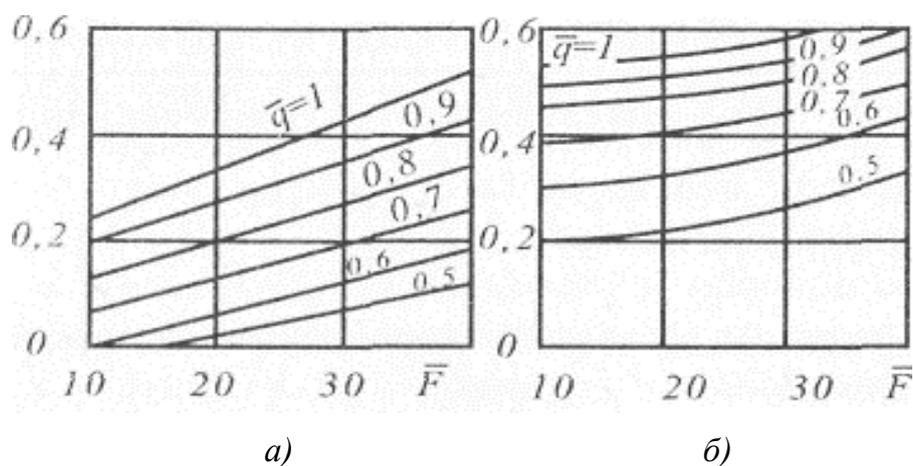


Рис. 19. К определению потерь теплоты с частью струи завесы шиберного типа, уходящей наружу: а – для боковой завесы; б – для нижней завесы

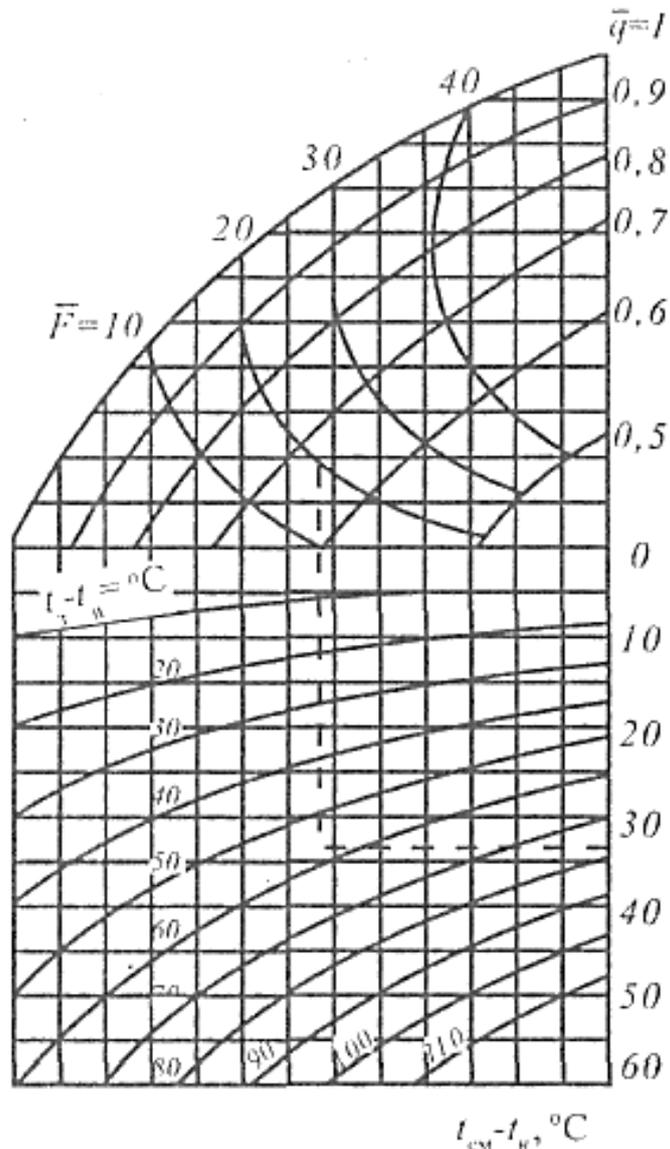


Рис. 20. Номограмма для определения температуры воздуха для боковой завесы шиберного типа

Тепловая мощность калориферов воздушно-тепловой завесы

$$Q_3 = AG_3(t_3 - t_{\text{нач}}), \quad (194)$$

где  $A = 0,28$  – коэффициент;

$t_{\text{нач}}$  – температура воздуха, забираемого для завесы, °C (на уровне всасывающего отверстия вентилятора  $t_{\text{нач}}$  принимается равной температуре смеси воздуха, поступающего в помещение; из верхней зоны, равной температуре воздуха в верхней зоне; снаружи – равной температуре наружного воздуха для холодного периода года, соответствующей параметрам Б).

Если в результате расчета  $t_3$  окажется меньше  $t_{нач}$ , то следует использовать завесы без калориферных секций.

Для экономии тепловой энергии целесообразно использовать комбинированные воздушно-тепловые завесы (КВТЗ), подающие часть воздуха без подогрева. КВТЗ состоят из двух пар вертикальных воздухораспределительных коробов (стояков), установленных внутри помещения (рис. 21).

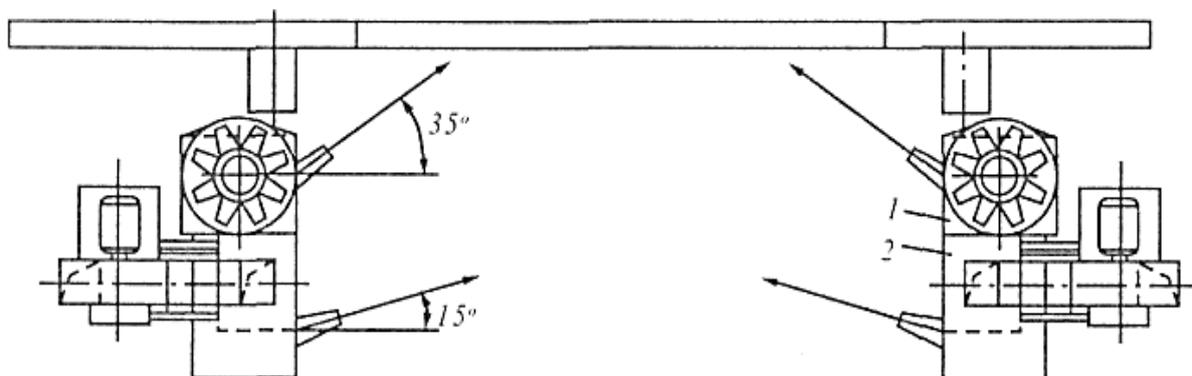


Рис. 21. Комбинированная воздушно-тепловая завеса: 1 – стояк наружной завесы неподогретого воздуха; 2 – стояк внутренней завесы нагретого воздуха

Наружная пара стояков, расположенная ближе к воротам, подает недогретый воздух, а внутренняя пара – нагретый до  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволяет снизить тепловые потери струи воздушной завесы.

Расчет КВТЗ ведется в следующем порядке:

Задается относительный расход воздуха и относительная площадь щелей наружной пары стояков воздушной завесы  $q_H$  и  $F_H$ . Рекомендуется принимать  $q_H = 0,8$ ;  $F_H = 0,15$  (см. рис. 19).

Затем вычисляется относительный расход воздуха через «внутреннюю» завесу по формуле

$$q = (t_{см} - t_H)(1 - q_H(1 - Q))/(70 - t_H) \quad (195)$$

Рассчитывается относительная площадь воздуховыпускных щелей «внутренней» завесы

$$F_3 = 0,84F_H q_H / q_B, \quad (196)$$

Определяется общая относительная площадь воздуховыпускных щелей и общий относительный расход КВТЗ:

$$F = F_B F_H (F_B + F_H), \quad (197)$$

$$q = q_H + q_B. \quad (198)$$

По полученным значениям  $F$  и  $q$  по табл. 14 находится  $m_{\text{пр}}$  и рассчитывается общий расход воздуха  $G$ , подаваемого КВТЗ по формуле (189).

После этого вычисляется расход воздуха через наружную и внутреннюю завесу соответственно

$$\begin{aligned} G_H &= G_3 q_H / q, \\ G_B &= G_3 q_B / q. \end{aligned} \quad (199)$$

Тепловая мощность калориферов КВТЗ рассчитывается по формуле (194) при  $G_3 = G_B$  и  $t_3 = 70^\circ\text{C}$ .

### Пример 1

Рассчитать боковую двустороннюю завесу и подобрать типовое решение, если завеса должна быть устроена у раздвижных ворот размерами  $F_{\text{пр}} = 3,6 \cdot 3,6 = 12,96 \text{ м}^2$  в одноэтажном производственном здании высотой 8,4 м, имеющем зенитные фонари.

Расчетная температура наружного воздуха  $t = -20^\circ\text{C}$ ;

$\rho_H = 1,39 \text{ кг/м}^3$ . Температура воздуха в помещении  $t = 18^\circ\text{C}$ ;

$\rho_C = 1,39 \text{ кг/м}^3$ . При работе завесы температура смеси воздуха  $t_{\text{см}} = 14^\circ\text{C}$ ;

$\rho_{\text{см}} = 1,23 \text{ кг/м}^3$ . Расчетная скорость ветра  $V_B = 2,5 \text{ м/с}$ .

Расчетный аэродинамический коэффициент  $e = 0,8$ .

Поправочный коэффициент  $K_1 = 0,2$  (см. табл. 15).

### Решение

Согласно табл. 14 принимаем значение  $q = 0,65$ . В этом случае и при  $F = 20 - 30$  для раздвижных ворот находим  $\mu = 0,3$ .

По табл. 16 при принятых размерах ворот и высоте здания  $h_{\text{расч}} = 2,4 \text{ м}$ .

Расчетная разность давлений по формулам (190), (191) составит  $\Delta P = 9,8 \cdot 2,4(1,39 - 1,21) + 0,2 \cdot 0,8 \cdot 5,5^2 \cdot 1,39/2 = 7,64 \text{ Па}$ .

Общий расход воздуха завесы по формуле (189)

$$G = 5100 \cdot 0,65 \cdot 0,3 \cdot 12,96(7,64 \cdot 1,23)^{1/2}.$$

Принимаем к установке по табл. 13 завесы типа ЗВТ1.00.000-03 суммарной производительностью по воздуху  $G_B = 40\,800$  кг/ч. Для принятого по табл. 13 решения получим  $F = 20$  и из формулы (189) вычислим

$$q = 40\,800 / (5100 \cdot 0,3 \cdot 12,96(7,64 \cdot 1,23)^{1/2}) = 0,67.$$

Требуемую температуру воздуха, подаваемого завесой, находим по формуле (193)

$$t_3 = -20 + [(14 + 20) / 0,67(1 - 0,1)] = 36 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Требуемую суммарную тепловую мощность калориферов завесы вычисляем по формуле (194)

$$Q = 0,28 \cdot 40\,800(36,4 - 14) = 255\,900 \text{ Вт}.$$

Поскольку суммарная тепловая мощность принятой типовой конструкции согласно табл. 13, составляет 511 700 Вт, т. е. вдвое больше требуемой, то в данном случае целесообразно в одном из агрегатов завесы не устанавливать калориферную секцию или принять однорядную установку калориферов.

### ***2.3.3. Завесы смешивающего типа***

Расход воздуха для воздушно-тепловой завесы смешивающего типа определяется по формуле

$$G_3 = 5100k_2\mu_{\text{вх}}F_{\text{вх}}(t_{\text{см}} - t_{\text{н}})(\Delta P\rho_{\text{н}})^{1/2} / (t_3 - t_{\text{см}}), \quad (200)$$

где  $k_2$  – поправочный коэффициент для учета числа проходящих людей, места забора воздуха для завесы и типа вестибюля (табл. 17);

$\mu_{\text{вх}}$  – коэффициент расхода, зависящий от конструкции входа (табл. 18);

$F_{\text{вх}}$  – площадь одной открываемой створки наружных входных дверей, м<sup>2</sup>.

Значение  $G_3$  принимают равным расходу воздуха, необходимого для приточной вентиляции, но не менее значения, определяемого по формуле (200).

Таблица 17. Поправочный коэффициент  $k_2$  для завес смешивающего типа

Место забора воздуха и тип вестибюля	Двери	Значения $k_2$ при числе людей $n$ , проходящих через вход в здание за 1 ч									
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Забор воздуха из открытого вестибюля	Одинарные	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,43
	Двойные или вращающиеся	0,04	0,08	0,11	0,15	0,19	0,21	0,26	0,30	0,34	0,38
	Тройные	0,03	0,06	0,08	0,11	0,14	0,16	0,20	0,25	0,28	0,32
То же закрытого	Одинарные	0,05	0,09	0,14	0,18	0,22	0,23	0,27	0,32	0,35	0,39
	Двойные или вращающиеся	0,03	0,07	0,10	0,14	0,17	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34
	Тройные	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,18	0,23	0,25	0,29
Забор воздуха снаружи или при открытом вестибюле	Одинарные	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,21	0,24	0,28	0,31	0,34
	Двойные или вращающиеся	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,17	0,21	0,24	0,27	0,30
	Тройные	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,20	0,23	0,26
То же при закрытом	Одинарные	0,04	0,07	0,11	0,14	0,17	0,18	0,22	0,25	0,28	0,31
	Двойные или вращающиеся	0,03	0,05	0,08	0,11	0,13	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27
	Тройные	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,18	0,20	0,22

Значение  $\Delta P$  определяют в результате расчета воздушного режима здания с учетом ветрового давления. При отсутствии полных исходных данных можно рассчитывать по формуле (191), где значение  $h_{расч}$  вычисляют с учетом ветрового давления в зависимости от этажности здания по формулам:

– для зданий с числом этажей три и меньше

$$h_{расч} = h_{лк} - 0,5h_{вх}, \quad (201)$$

– для зданий с числом этажей больше трех

$$h_{расч} = 0,5(h_{лк} + 2h_{эт} - h_{дв}), \quad (202)$$

где  $h_{лк}$  – высота лестничной клетки от планировочной отметки земли, м;

$h_{дв}$  – высота створки входных дверей, м;

$h_{эт}$  – полная высота одного этажа, м.

Таблица 18. Коэффициент расхода  $\mu_{\text{вх}}$

Конструкция входа	Коэффициент $\mu_{\text{вх}}$
Одинарные двери	0,6
Двойные двери с тамбуром, прямой проход	0,6
Тройные двери с тамбуром, прямой проход	0,6
Двойные двери с тамбуром, зигзагообразный проход	0,55
Тройные двери с тамбуром, зигзагообразный проход	0,4
Вращающиеся двери	0,1

Тепловую мощность калориферов воздушно-тепловой завесы определяют по формуле (194).

### Пример 2

Рассчитать воздушно-тепловую завесу для главного входа в административное здание при заборе воздуха из открытого вестибюля. Входные двери вращающиеся ( $\mu_{\text{вх}}$  по табл. 18).

Исходные данные:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{н}} &= -25 \text{ }^\circ\text{C}; & \rho_{\text{н}} &= 1,42 \text{ кг/м}^3; & t_{\text{в}} &= 16 \text{ }^\circ\text{C}; \\
 \rho_{\text{в}} &= 1,22 \text{ кг/м}^3; & t_{\text{см}} &= 12 \text{ }^\circ\text{C}; & h_{\text{лк}} &= 60 \text{ м}; \\
 h_{\text{дв}} &= 2,5 \text{ м}; & h_{\text{эт}} &= 3,3 \text{ м}; & F_{\text{вх}} &= 0,8 - 2,5 = 2 \text{ м}^2; \\
 n &= 2500 \text{ чел./ч.}
 \end{aligned}$$

### Решение

Находим значение  $h_{\text{расч}}$  по формуле (201)

$$h_{\text{расч}} = 0,5(60 + 2 + 3,3 - 2,5) = 32,1.$$

Определяем  $\Delta P$

$$\Delta P = 9,8 - h_{\text{расч}}(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) = 9,8 - 32,1(1,42 - 1,22) = 62,9 \text{ Па.}$$

Находим коэффициент  $k_2$  по табл. 17; так как число людей, проходящих в здание, превышает 1500 чел./ч, то расчетное число людей одной створки составит  $n = 2500/2 = 1250$  чел./ч.

При заборе воздуха из открытого вестибюля, вращающихся дверях и числе людей, проходящих через одну створку, 1250 за один час получим  $k_2 = 0,46$ . Определяем  $G_3$  по формуле (200) с учетом того, что люди проходят одновременно через две створки и температура  $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}
 G_3 &= 5100 \cdot 0,46 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 2(12 + 25)(62,9 \cdot 1,42)^{1/2} / (50 - 12 = \\
 &= 8630 \text{ кг/ч.}
 \end{aligned}$$

Вычисляем  $Q_3$  по формуле (194):

$$Q_3 = 0,28 - 8630(50 - 12) = 91820 \text{ Вт.}$$

## 2.4. Воздушное душирование (кондиционирование)

Если допустимые нормы (табл. 19) невозможно обеспечить по производственным или экономическим условиям, то следует предусмотреть воздушное душирование, или кондиционирование, воздуха на постоянных рабочих местах. Значения параметров А и Б приведены в табл. 20.

Таблица 19. Величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с		
		воздуха	поверхности				
<b>Оптимальные</b>							
Холодный	Ia (до 139)	22 – 24	21 – 25	16 – 40	0,1		
	Iб (140 – 174)	21 – 23	20 – 24	16 – 40	0,1		
	IIa (175 – 232)	19 – 21	18 – 22	16 – 40	0,2		
	IIб (233 – 290)	17 – 19	16 – 20	16 – 40	0,2		
	III (более 290)	16 – 18	15 – 19	16 – 40	0,3		
Теплый	Ia (до 139)	23 – 25	22 – 26	16 – 40	0,1		
	Iб (140 – 174)	22 – 24	21 – 25	16 – 40	0,1		
	IIa (175 – 232)	20 – 22	19 – 23	16 – 40	0,2		
	IIб (233 – 290)	19 – 21	18 – 22	16 – 40	0,2		
	III (более 290)	18 – 20	17 – 21	16 – 40	0,3		
<b>Допустимые</b>							
Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более
Холодный	Ia (до 139)	20,0 – 21,9	24,1 – 25,0	19 – 26	15 – 75*	0,1	0,1
	Iб (140 – 174)	19,0 – 20,9	23,1 – 24,6	18 – 25	15 – 75	0,1	0,2
	IIa (175 – 232)	17,0 – 18,9	21,1 – 23,0	16 – 24	15 – 75	0,1	0,3
	IIб (233 – 290)	15,0 – 16,9	19,1 – 22,0	14 – 23	15 – 75	0,2	0,4
	III (более 290)	13,0 – 15,9	18,1 – 21,0	12 – 22	15 – 75	0,2	0,4

Допустимые							
Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более
Теплый	Ia (до 139)	21,0 – 22,9	25,1 – 28,0	20 – 29	15 – 75	0,1	0,2
	Iб (140 – 174)	20,0 – 21,9	24,1 – 28,0	19 – 29	15 – 75	0,1	0,3
	IIa (175 – 232)	18,0 – 19,9	22,1 – 27,0	17 – 28	15 – 75	0,1	0,4
	IIб (233 – 290)	16,0 – 18,9	21,1 – 27,0	15 – 28	15 – 75	0,2	0,5
	III (более 290)	15,0 – 16,9	20,1 – 26,0	14 – 27	15 – 75	0,2	0,5

Допустимые температуры относительной влажности воздуха в обслуживаемой зоне жилых и административно-бытовых помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Скорость движения воздуха, м/с, не более	Относительная влажность воздуха, %
Теплый	Не более чем на 3 °С выше расчетной температуры наружного воздуха	65	0,5
Холодный и переходные условия	18 – 22	65	0,2

Таблица 20. Значения параметров А и Б

Наименование пункта	Расчетная географическая широта, с. ш.	Барометрическое давление, гПа	Период года	Параметр А			Параметр Б			Среднесуточная температура воздуха, °С
				Температура воздуха, °С	Удельная энтальпия, кДж/кг	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С	Удельная энтальпия, кДж/кг	Скорость ветра, м/с	
Мичуринск	52	990	Теплый	24,4	51,5	1	29	54,4	1	11,7
			Холодный	-15	-13	4,8	-28	-25,5	3,2	-
Москва	56	990	Теплый	22,3	49,4	1	28,5	54	1	10,4
			Холодный	-15	-11,7	4,7	-26	-25,3	4	-

Окончание табл. 20

Наименование пункта	Расчетная географическая широта, с. ш.	Барометрическое давление, гПа	Период года	Параметр А			Параметр Б			Среднесуточная температура воздуха, °С
				Температура воздуха, °С	Удельная энтальпия, кДж/кг	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °С	Удельная энтальпия, кДж/кг	Скорость ветра, м/с	
Мурманск	68	1010	Теплый	16,6	41,4	3,8	22	42,7	3,8	8,9
			Холодный	-18	-16,3	8,7	-27	-26,6	8,4	-
Наманган	40	950	Теплый	34,2	62,4	1	37	65,7	1	14,9
			Холодный	-1	-3,8	2,2	-14	-12	1	-
Нарьян-Мар	68	1010	Теплый	17,7	44,8	5,2	23	46,5	5,2	9
			Холодный	-25	-4,3	7	-37	-36,8	7	-
Нарым	60	990	Теплый	22,8	38,5	3,3	27,5	41,4	3,3	-
			Холодный	-28	-27,6	4,7	-42	-42,3	4,6	-
Нерчинский завод	52	950	Теплый	23,5	51,5	1	27,2	55,3	1	13,2
			Холодный	-31	-30,6	2	-41	-41	2	-
Нижнеудинск	6	950	Теплый	23	49,4	1	27,7	53,2	1	13,7
			Холодный	-24	-23	2	-40	-38,9	2	-
Нижний Новгород	56	990	Теплый	21,2	51,1	1	26,8	54,9	1	9,5
			Холодный	-16	-14,2	4,1	-30	-29,7	4	-
Нижний Тагил	56	970	Теплый	21,5	46,5	1	26,3	50,2	1	12,6
			Холодный	-21	-19,7	3,7	-36	-31,9	3	-
Николаевск	48	1010	Теплый	27,9	58,2	3,2	31	62	3,2	12,5
			Холодный	-7	-2,9	11	-20	-18,6	10	-
Николаевск на Амуре	52	1010	Теплый	19,6	46,1	3,4	23,9	52,3	3,4	9,5
			Холодный	-25	-24,3	8	-35	-35,2	6	-
Новгород	60	1010	Теплый	20,8	48,6	4	24,5	52,8	4	11,2
			Холодный	-12	-9,2	5	-27	-26,8	5	-

### **Постоянное рабочее место**

Место, на котором работающий находится большую часть своего рабочего времени (более 50 % или более 2 ч непрерывно). Если при этом работа осуществляется в различных пунктах рабочей зоны, постоянным рабочим местом считается вся рабочая зона.

### **Непостоянное рабочее место**

Место, на котором рабочий находится меньшую часть (менее 50 % или менее 2 ч непрерывно) своего рабочего времени.

### **Рабочая зона**

Пространство, ограниченное по высоте 2 м над уровнем пола или площадки, на которых находятся места постоянного или непостоянного (временного) пребывания работающих.

### **Рабочее место**

Место постоянного или временного пребывания работающих в процессе трудовой деятельности.

Воздушное душирование также применяется при тепловых облучениях и если технологическое оборудование, выделяющее вредные вещества, не имеет укрытий или местной вытяжной вентиляции. При душировании можно подавать или наружный воздух с обработкой его в приточных камерах (очисткой, охлаждением и нагреванием в холодный период года), или внутренний воздух. Для воздушного душирования следует предусматривать минимальную турбулизацию воздушной струи, позволяющей изменять ее направление в горизонтальной плоскости на угол  $180^\circ$  и в вертикальной плоскости на угол  $30^\circ$ . Воздушное душирование должно обеспечивать на постоянных рабочих местах [10] температуру и скорость воздуха в соответствии с требованиями табл. 21.

Душирование наружным воздухом рекомендуется применять также при интенсивности облучения  $350 \text{ Вт/м}^2$  и более.

В табл. 6.2 [12] приведена интенсивность теплового облучения на рабочих местах для отдельных видов производств.

Душирующие воздухораспределители типа УДВ приведены в работе [12] на рис. 6.1 – 6.4, 6.7 и в табл. 6.3 [12].

Таблица 21. Расчетные нормы температур и скорости движения воздуха при воздушном душировании

Категория работ	Температура воздуха вне помещения	Средняя на 1м <sup>2</sup> скорость воздуха в душирующей струе на рабочем месте, м/с	Температура смеси воздуха в душирующей струе, °С, на рабочем месте при поверхностной плотности лучистого теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>				
			140 – 350	700	1400	2100	2800
Легкая – I	Принимать по табл. 19	1	28	24	21	16	–
		2	–	28	26	24	20
		3	–	–	28	26	24
		3,5	–	–	–	27	25
Средней тяжести – II	То же	1	27	22	–	–	–
		2	28	24	21	16	–
		3	–	27	24	21	18
		3,5	–	28	25	22	19
Тяжелая – III	То же	2	25	19	16	–	–
		3	26	22	20	18	17
		3,5	–	23	22	20	19

*Примечания:* 1. При температуре воздуха вне струи, отличающейся от указанной в таблице, температуру смеси воздуха в душирующей струе на рабочем месте следует повышать или понижать на 0,4 °С на каждый градус разности от значения, приведенного в таблице, но принимать не ниже 16 °С.

2. Поверхностную плотность лучистого теплового потока следует принимать равной средней за время облучения. При длительности воздействия лучистого теплового потока менее 15 или более 30 мин непрерывной работы температуру смеси воздуха в душирующей струе допускается принимать соответственно на 2 °С выше или ниже значений, приведенных в таблице.

3. Для промежуточных значений поверхностной плотности лучистого теплового потока температуру смеси воздуха в душирующей струе следует определять интерполяцией.

### ***Порядок расчета воздушного душирования***

Расчет ведется по предельным значениям параметров воздушной струи на постоянном рабочем месте. Исходные данные:

– минимальная температура воздушной струи (см. табл. 21) при температуре воздуха в помещении выше нормируемой. Если в помещении температура ниже нормируемой, то температуру струи воздуха следует принимать по табл. 21 при тепловом облучении интенсивностью 350 Вт/м<sup>2</sup> и более или по [8, 13] при открытых производственных процессах;

- скорость движения воздушной струи по табл. 21 или по [8, 13] для открытых производственных процессов;
- минимальное расстояние от входного отверстия душирующего воздухораспределителя до рабочего места;
- интенсивность облучения, Вт/м<sup>2</sup>;
- тяжесть выполняемой работы.

При расчете определяется типоразмер душирующего воздухораспределителя, его площадь  $F_0$ , скорость выпуска воздуха  $V_0$  и расход воздуха  $L$  при  $t_{\text{норм}} > t_0$ :

$$F_0 = [(t_{\text{рз}} - t_{\text{норм}})/n(t_{\text{рз}} - t_0)]^2,$$

$$V_0 = (V_{\text{норм}}x)/(mF_0^{1/2}),$$

где  $t$  – температура в рабочей зоне;

$t_0$  – температура после адиабатической обработки подаваемого воздуха;

$x$  – расстояние от воздухораспределителя до рабочего места;

$m, n$  – коэффициенты воздухораспределителя (табл. 6.3 [12]).

При  $t_{\text{норм}} < t_0$ :  $F_0 = (x/n)^2$ ,  $V_0 = V_{\text{норм}}$ , т. е. требуется искусственное охлаждение воздуха. Величина  $t_0$  должна быть меньшей или равной нормируемой.

При газо- или пылевыведениях  $V_0$  рассчитывается по формуле

$$V_0 = (V_{\text{норм}}x)/(mF_0^{1/2}) \geq V_{\text{норм}}, \text{ а } F_0 = [(Z_{\text{рз}} - \text{ПДК})/n(Z_{\text{рз}}Z_0)]^2,$$

где  $Z_{\text{рз}}, Z_0$  – соответственно концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны и в воздухе на выходе из воздухораспределителя.

ПДК – предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны [8] – это концентрации, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч или при другой продолжительности, но не более 41 ч в неделю, в течение всего рабочего стажа не могут вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

Зона дыхания – пространство в радиусе до 50 см от лица работающего.

На рис. 6.9 – 6.14 в работе [12] приведены номограммы, построенные по данным формулам для типовых конструкций душирующих воздухораспределителей.

## **2.5. Порядок расчета систем аспирации**

Исходные данные для расчета:

- минералогический состав пыли;
- основные свойства пыли: плотность (насыпная и истинная), коагуляция, смачиваемость, слипаемость, абразивность, удельное электрическое сопротивление;
- свойства газового потока: температура, плотность, кинематическая или динамическая вязкость;
- начальная концентрация пыли в месте ее образования;
- дисперсный состав пыли, т. е. содержание фракций по «частным остаткам» или «полным проходам».

Последовательность расчета:

1. По [14] выделяется пять основных классификационных групп аэрозолей:

I – очень крупнодисперсная пыль;

II – крупнодисперсная пыль (например, песок для строительных растворов по [15]);

III – среднедисперсная пыль (например, цемент);

IV – мелкодисперсная пыль (например, кварц молотый по [16]);

V – очень мелкодисперсная пыль.

Классификационная группа пыли определяется по номограмме (рис. 22). Для пользования номограммой следует иметь результаты ситового анализа пыли. Определяется дисперсный состав по «полным проходам». На номограмму наносят точки, соответствующие содержанию первых пяти фракций, и, соединяя их, получают линию, указывающую на классификационную группу.

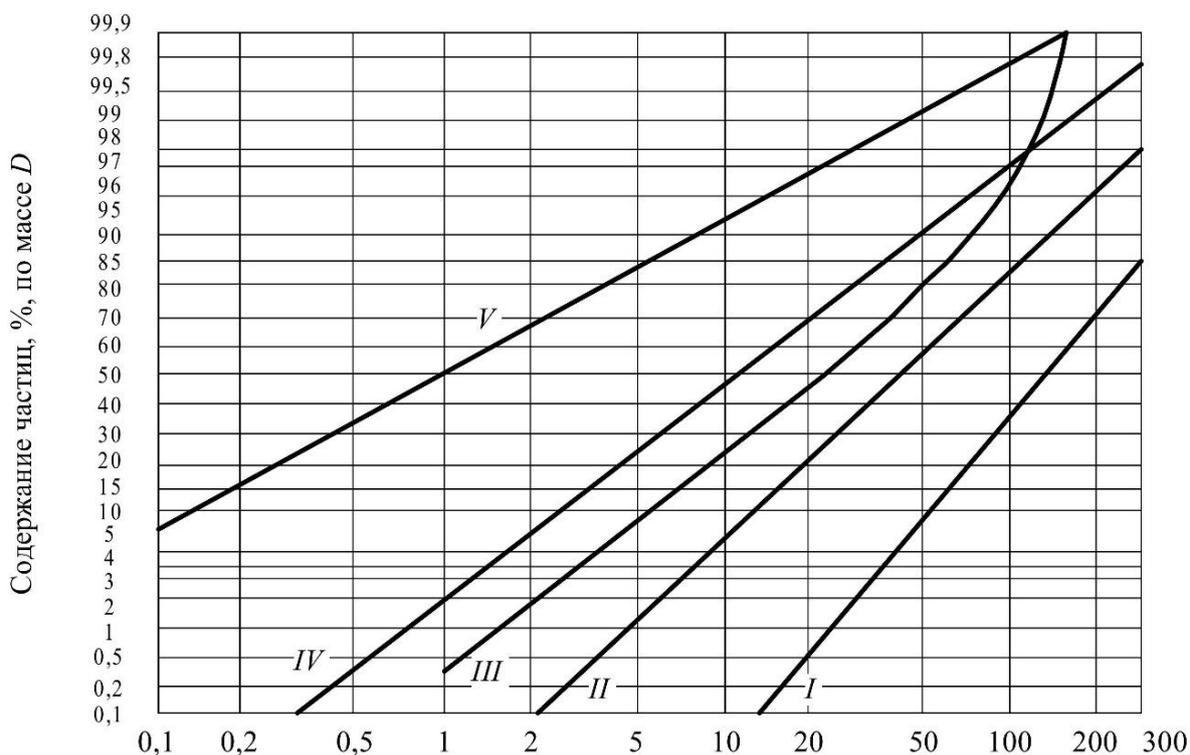


Рис. 22. Классификационная номограмма пылей по [14]

**Пример.** Определить классификационную группу пыли, если по опытным данным она имеет следующий дисперсный состав:

Размер частиц, мкм	< 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	60
Содержание фракций по «частным остаткам» $R(d)$ , % по массе	10	16	24	22	12	16

**Решение.** Рассчитываем дисперсный состав пыли по «полным проходам»:

Размер частиц, мкм	< 5	< 10	< 20	< 40	< 60
Содержание фракций по «полным проходам» $R(d)$ , % по массе	10	26	50	72	84

1. Наносим точки, соответствующие содержанию первых пяти фракций по «полным проходам» на номограмму рис. 22 и, соединив их, получим линию, расположенную в зоне III. Следовательно, данная пыль относится к III классификационной группе. Распределение дис-

перности частиц за пределом интервала  $5 < d < 60$  известно. Оно может сохранять линейный характер, например для области размеров  $< 5$  мкм, но может быть усеченным, как показано на рис. 22, для области размеров  $> 60$  мкм. При оценке дисперсности пыли эта область не учитывается.

В тех случаях, когда график фракционного состава аэрозоля, нанесенный на классификационную номограмму, пересекает границы зон, пыль относят к классификационной группе высшей из зон.

2. Все пыли IV и V групп дисперсности практически относятся к сильнослипающимся пылям, а пыли III группы – к среднеслипающимся. В табл. 22 дана характеристика пыли по слипаемости.

Таблица 22. Характеристика пыли по слипаемости

Классификационная группа пыли по слипаемости	Характеристика классификационной группы	Характерные пыли
I	Неслипающаяся $\leq 60$ Па	Шлаковая пыль; песок кварцевый
II	Слабослипающаяся 60 – 300 Па	Коксовая пыль; апатитовая сухая пыль; летучая зола при слоевом сжигании углей всех видов и при сжигании сланцев; магнезитовая пыль; доменная пыль (после первичных осадителей); шлаковая пыль
III	Среднеслипающаяся 300 – 600 Па	Летучая зола при пылевидном сжигании каменных углей без недожога; торфяная зола; влажная магнезитовая пыль; металлическая пыль; колчеданы; оксиды свинца, цинка и олова; сухой цемент; сажа; сухое молоко; мучная пыль; опилки
IV	Сильнослипающаяся $> 600$ Па	Гипсовая и алебастровая пыль; нитрофоска; двойной суперфосфат; цементная пыль, выделенная из влажного воздуха; волокнистая пыль (асбест, хлопок, шерсть и др.); масса пыли с размером частиц $< 10$ мкм

3. Частицы мельче 10 мкм, в особенности мельче 5 мкм, как правило, становятся несмачиваемыми (гидрофобными) независимо от их состава.

4. В вентиляционной практике взрывоопасной пылью считаются аэрозоли, нижний концентрационный предел распространения пламени которых менее  $65 \text{ г/м}^3$ . Пыли, у которых нижний предел более  $65 \text{ г/м}^3$ , считаются горючими.

5. Используя технологическую карту производства, цеха, участка, составляем схему системы аспирации (рис. 23), [17, с. 243]. Порядок расчета воздухопроводов систем аспирации приведен в работе [17].

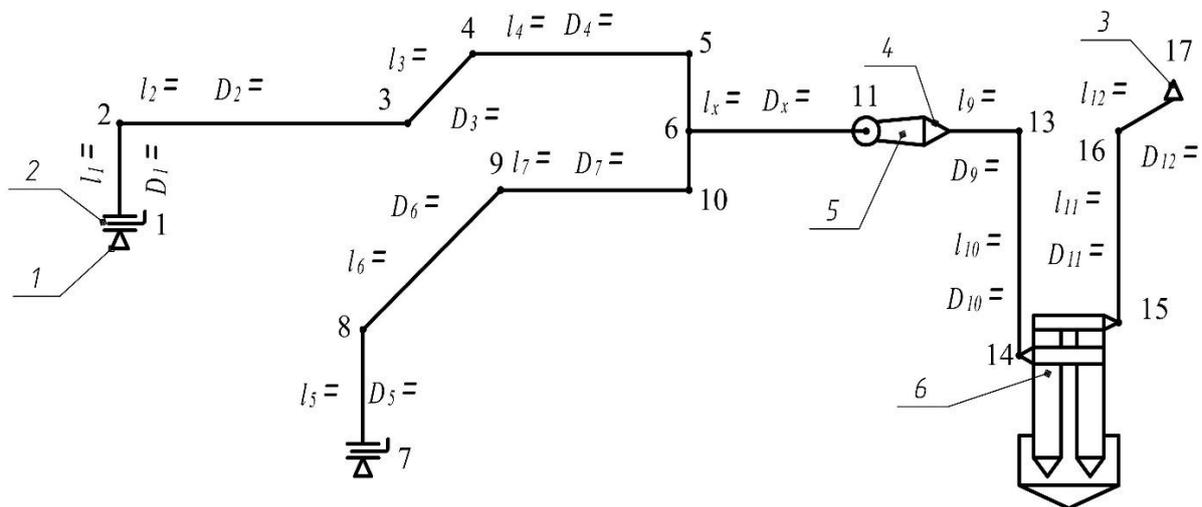


Рис. 23. Схема системы аспирации: 1 – пылеприемник; 2 – задвижка; 3 – насадка с зонтом АС8-400; 4 – переходный патрубок; 5 – вентилятор пылевой типа ВЦП6-45-5-01У2; 6 – батарейный циклон типа БЦШ-400

6. Подбираем тип пылевого вентилятора. Характеристики вентиляторов приведены на рис. 24 и в литературе [17] и [18]. Для этого определяются требуемый расход воздуха  $Q$  и потери давления в сети  $P$ .

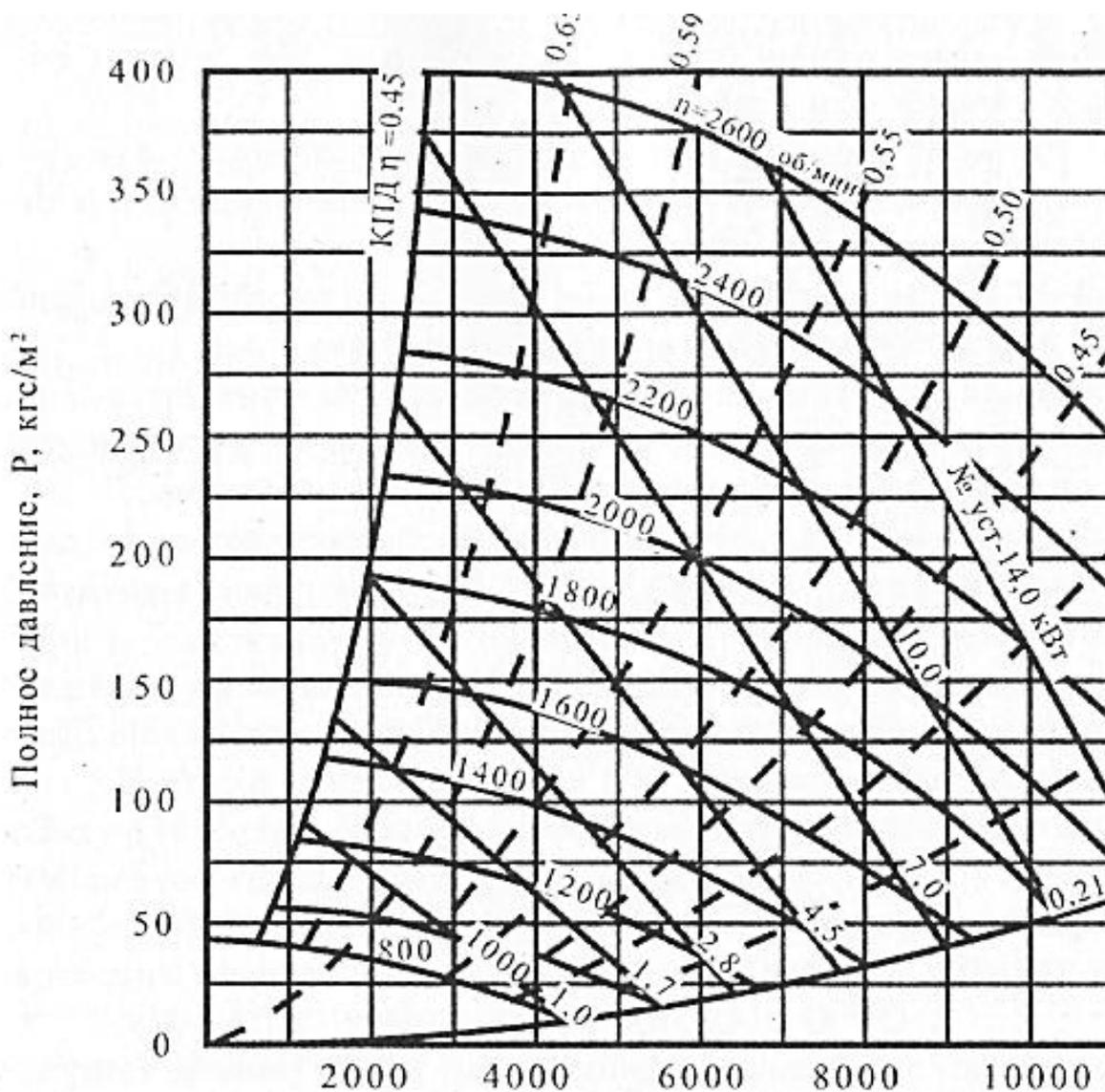


Рис. 24. Аэродинамическая характеристика ВЦП-6-45-5

6.1. Объем воздуха следует определять по формулам, приведенным (в табл. 10, 11 [12], и таблицам в работе [19] как сумму, которая складывается из объема воздуха, вносимого в укрытие поступающим материалом  $Q_3$ , и объема  $Q_H$ , просасываемого через неплотности укрытия для предотвращения поступления пыли в помещение,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ,

$$Q = Q_3 + Q_H. \quad (203)$$

Концентрация аэрозолей в выбросах уходящего воздуха при расходе воздуха более  $15000 \text{ м}^3/\text{ч}$

$$C_{yx} = 100R, \text{ мг}/\text{м}^3, \quad (204)$$

где  $R$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от предельно допустимой концентрации (ПДК) аэрозолей в воздухе рабочей зоны производственных помещений согласно [8], мг/м<sup>3</sup>:

ПДК	До 2	2 – 4	4 – 6	6 – 10
$R$	0,3	0,6	0,8	1,0

Концентрацию аэрозолей в выбросах объемом менее 15 тыс. м<sup>3</sup> с учетом меньшего влияния на загрязнение атмосферы допускается принимать несколько большей по формуле, мг/м<sup>3</sup>,

$$C_{yx} = (160 - 4Q)R, \quad (205)$$

где  $Q$  – объем выброса, тыс. м<sup>3</sup>.

Концентрация, рассчитанная по данным формулам, проверяется на условие, что в результате рассеивания выброса в атмосфере концентрация аэрозолей с учетом фоновой загрязненности атмосферы не превышает:

а) в приземном слое атмосферы населенных пунктов – концентраций, указанных в [20], но не более ПДК для населенных мест [10];

б) в воздухе, поступающем в производственные и вспомогательные здания и сооружения через приемные отверстия систем приточной вентиляции и через открывающиеся проемы – 30 % ПДК тех же аэрозолей, в рабочей зоне помещений – по [8]. Валовой выброс каждого источника не должен превышать установленного для него ПДВ.

Если известно количество образующей пыли ( $M$ , мг/ч), то требуемую производительность вентилятора можно определить, как

$$Q = M / (C_{пр} - C_{yx}), \quad (206)$$

где  $C_{пр}$  – концентрация пыли в приточном воздухе, мг/м<sup>3</sup>;

$C_{yx}$  – концентрация пыли в уходящем воздухе.

6.2. Потери давления в сети определяются по формуле, Па,

$$P = P_{тр}L + P_m, \quad (207)$$

где  $P_{тр}$  – удельная потеря давления на трение на 1 п. м. воздуховода, Па;

$L$  – длина участка воздуховода, м;

$P_m$  – потеря давления на местные сопротивления, Па.

Расчетная таблица сети воздуховодов систем аспирации приведена в работе [12].

Удельную потерю давления на трение для круглых воздуховодов определяют по формуле

$$P_{\text{тр}} = (\lambda/d)(V^2 \rho/2), \quad (208)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трению;

$d$  – диаметр воздуховода, м;

$V$  – скорость воздуха в воздуховоде, м/с;

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

$V^2 \rho/2$  – скоростное (динамическое) давление воздуха, Па.

Значения  $\lambda/d$  следует принимать по табл. 22.56 [12].

Для воздуховодов прямоугольного сечения за величину  $d$  принимают эквивалентный диаметр  $d_{\text{э}}$  таких круглых воздуховодов, которые при одинаковой скорости имеют те же потери давления на трение, что и прямоугольные воздуховоды, м,

$$d_{\text{э}} = 2ab/(a + b), \quad (209)$$

где  $a$  и  $b$  – размеры стенок прямоугольного воздуховода, м.

Потери давления на местные сопротивления определяются по формуле, Па,

$$P_{\text{м}} = e\xi(V^2 - \rho/2), \quad (210)$$

где  $\xi$  – сумма коэффициентов местного сопротивления.

Коэффициенты местных сопротивлений приведены в таблицах гл. 22 [27].

Пример расчета потерь давления в сети воздуховодов приведен в табл. 22.58 [12].

6.3. Для определения площади сечения воздуховодов следует воспользоваться рекомендуемыми скоростями движения воздуха, которые приведены в табл. 22.57 [12].

Сечение воздуховодов должно обеспечивать скорость движения воздуха не ниже допустимой для пыли данного вида

$$V = 1,3\rho_{\text{м}}^{1/3}, \quad (211)$$

где  $\rho_{\text{м}}$  – объемная масса материала, кг/м<sup>3</sup>.

При подъеме механических примесей на высоту следует учитывать формулы (22.16), (22.17) [12].

7. По расходу воздуха и величине потерь давления подбираем тип и номер требуемого вентилятора (см. рис. 24), пользуясь характеристикой пылевых вентиляторов, которые также приведены в приложениях справочника [12].

8. Выбираем и рассчитываем пылеуловители.

Пылеуловители, применяемые для очистки воздуха от аэрозольных частиц, делятся на пять классов (табл. 23).

Таблица 23. Классы пылеуловителей

Класс пылеуловителя	Размер эффективно улавливаемых частиц пыли, мкм	Группа пыли по дисперсности	Эффективность пылеуловителей, %
1-й	Более 0,3 – 0,5	V	< 80
		IV	99,9 – 80
2-й	Более 2	IV	92 – 45
		III	99,9 – 92
3-й	Более 4	III	29 – 80
		II	99,9 – 99
4-й	Более 8	II	99,9 – 95
		I	> 99,9
5-й	Более 20	I	> 99

Пылеуловители 1-го класса отличаются большим расходом энергии (высоконапорные пылеуловители Вентури), сложностью и дорогой визной эксплуатации (многопольные электрофильтры, рукавные фильтры и пр.).

В табл. 23 указаны границы эффективности пылеуловителей каждого из классов на основе классификации аэрозолей по рис. 22. Первое из значений эффективности относится к нижней границе соответствующей зоны, вторые – к верхней. Эффективность рассчитана из условий отделения от воздуха только практически полностью (эффективно) улавливаемых частиц, размер которых указан в табл. 23. Действительная эффективность пылеуловителей больше за счет частичного улавливания частиц по размеру меньших, чем указано в табл. 23.

Номенклатура конкретных пылеуловителей, рекомендуемых для очистки аспирационного воздуха, приведена в табл. 24, пользуясь которой по классификационной группе пыли и дисперсности (см. рис. 22) подбирают тип и вид пылеуловителя.

Таблица 24. Номенклатура пылеуловителей, рекомендуемых для очистки аспирационного воздуха

Тип	Вид	Класс пылеуловителя	Область целесообразного применения					Сопротивление, Па
			Классификационная группа аэрозолей по дисперсности					
			I	II	III	IV	V	
Гравитационные	Пылеосадочные камеры (произвольные конструкции)	5	+	+	-	-	-	100 – 200
Инерционные, циклоны	Циклоны большой пропускной способности: одиночные циклоны ЦН-15, ЦН-24	5	+	+	-	-	-	600 – 750
	групповые циклоны ЦН-15	5	+	+	-	-	-	600 – 750
	Циклоны высокой эффективности: одиночные циклоны СКЦН-34	4	-	+	-	-	-	1000 – 1200
	микроплочные циклоны ЦВП	4	-	+	-	-	-	600 – 800
Скрубберы	ВТИ-ПСП скоростные промыватели СИОТ	3	-	+	+	-	-	900 – 1100
	Струйные, мокрые: ПВМ	3	-	-	+	+	-	1200 – 1950
	ПВМК, ПВМС, ПВМБ	2	-	-	+	+	-	2000 – 3000
	Капельные, типа Вентури КМИ	2	-	-	+	+	-	3000 – 4000
Тканевые	Рукавные пылеуловители СМЦ-101, СМЦ-166Б, ФВК (ГЧ-1 БФМ), ФРКИ	2	-	-	+	+	-	1200 – 1250
	Сетчатые капроновые, металлические сетки для улавливания волокнистой пыли, Вентури, электрофилтры	5	+	-	-	-	-	150 – 300
Волокнистые	Уловители туманов кислот и щелочей ФВГ-Т	2	-	-	-	+	-	800 – 1000
	Уловители аэрозолей масел (ротационные)	2	-	-	-	+	-	800 – 1000
Электрические	Уловители туманов масел и маслянистых жидкостей УУП	2	-	-	-	+	+	50 – 100

9. Рассчитываем потери давления в пылеуловителе. Они находятся как составная часть скоростного давления, т. е.

$$P_n = \xi_n (\rho_g V^2 / 2), \quad (212)$$

где  $\xi_n$  – коэффициент местного сопротивления пылеуловителя;

$\rho_g$  – плотность газового потока.

Для грубой оценки величины сопротивления (потерь давления) различных пылеуловителей можно воспользоваться данными, приведенными в табл. 24.

Детальный выбор типа пылеуловителя приводится в гл. 4 [12].

При определении потерь давления в циклоне  $\xi_n = \xi_{ц}$  величина  $\xi_{ц}$  определяется по формуле

$$\xi_{ц} = k_1 k_2 \xi_0 + \Delta \xi_0, \quad (213)$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от диаметра циклона (табл. 25);

$k_2$  – коэффициент на запыленность воздуха (табл. 26);

$\xi_0$  – коэффициент местного сопротивления циклона  $D = 500$  мм (табл. 27);

$\Delta \xi_0$  – коэффициент, зависящий от принятой компоновки группы циклонов (табл. 28); для одиночных циклонов  $\Delta \xi_0 = 0$ .

Таблица 25. Поправочный коэффициент  $k_1$

Диаметр циклона, мм	Значение коэффициента $k_1$ для циклонов марок		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24	СКД-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34м
150	0,94	0,85	1
200	0,45	0,90	1
300	0,96	0,93	1
450	0,99	1	1
500	1	1	1

Таблица 26. Поправочный коэффициент  $k_2$

Марка циклона	Значение коэффициента $k_2$ при запыленности воздуха, г/м <sup>3</sup>					
	0	10	20	40	80	120
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,9	0,87
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,9	0,87
ЦН-15у	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,9	0,87
СКД-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91
СК-ЦН-34м	1	0,99	0,97	0,95	–	–

Таблица 27. Коэффициенты местных сопротивлений  $\xi$  циклонов диаметром 500 мм и оптимальные скорости движения воздуха

Марка циклона	Скорость движения воздуха, м/с		Значение $\xi$ циклонов				При групповой установке $\xi_0$
			С выбросом в атмосферу		С улиткой на выхлопной трубе		
	$V_0$	$V_{вх}$	$\xi_0$	$\xi_{вх}$	$\xi_0$	$\xi_{вх}$	
ЦН-11	3,5	–	250	6,1	235	5,2	215
ЦН-15	3,5	–	163	7,8	150	6,7	140
ЦН-15у	3,5	–	170	8,2	158	7,5	148
ЦН-24	4,5	–	80	10,9	73	12,5	70
СДК-ЦН-33	2	–	600	20,3	500	31,3	–
СК-ЦН-34м	2	–	2000	–	–	30,3	–
СК-ЦН-34	1,7	–	1150	24,9	–	30,3	–
СИОТ	–	12 – 15	–	6	–	4,2	–
ЛИОТ	–	12 – 15	–	4,2	–	3,7	–
ВЦНИИОТ	–	12 – 15	–	10,5	–	10,4	–

Таблица 28. Коэффициент  $\Delta\xi_0$

Компоновка циклонов	Значение $\Delta\xi_0$
Прямоугольная с отводом очищенного воздуха из общего коллектора	35
Прямоугольная, но с отводом очищенного воздуха через улиточные раскручиватели	28
Круговая	60

10. Рассчитываем основные размеры выбранного пылеуловителя. Они определяются в зависимости от производительности выбранного вентилятора ( $Q$ , м<sup>3</sup>/ч) и оптимальных скоростей для данного вида пылеуловителя. Так, для циклонов оптимальный диаметр рассчитывается по формуле

$$D = 0,94(Q^2 \rho_{\Gamma} \xi_{\text{ц}} / P_{\text{ц}})^{1/2}, \quad (214)$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газового потока;

$\xi_{\text{ц}}$  – коэффициент местного сопротивления циклона;

$P_{\text{ц}}$  – потери давления в циклоне.

Диаметр циклона можно найти также из площади сечения циклона  $F$

$$F = Q/V_0, \text{ м}^3, \quad (215)$$

где  $V_0$  – скорость движения воздуха (см. табл. 27), м/с.

Зная диаметр циклона  $D$ , определяем основные размеры пылеуловителя

$$D_{\text{вых}} = 0,59D, \quad (216)$$

где  $D_{\text{вых}}$  – диаметр выхлопной трубы.

Размеры входного патрубка  $a \times b = D \cdot 0,26 \times D \cdot 1,11$ . Общая высота  $H = D \cdot 4,26$

11. Определяем коэффициент очистки воздуха от пыли

$$h = \Delta M / M_1 = M_1 - M_2 / M_1 = 1 - M_2 / M_1, \quad (217)$$

где  $\Delta M$  – количество улавливаемой пыли;

$M_1$  и  $M_2$  – соответственно количество пыли, поступающей и выходящей из пылеотделителя.

## **2.6. Расчет местных воздухоприемников, встроенных в оборудование для пайки и лужения**

### **2.6.1. Общие положения**

1. При разработке технологических процессов, для осуществления которых конструируется оборудование, следует предусматривать:

- автоматизацию загрузки и выгрузки, дистанционное управление, а также автоматическую сигнализацию о ходе отдельных операций, связанных с возможным выделением вредных веществ;
- автоматическое поддержание заданных температур, автоблокировку технологического оборудования и вентиляционных устройств;
- замену вредных веществ в производстве безвредными или менее вредными;
- тепловую изоляцию нагретых поверхностей оборудования, воздуховодов, трубопроводов.

2. Технологическое оборудование, работа которого сопровождается выделением вредных веществ, должно иметь встроенные местные воздухоприемники или размещаться внутри вентилируемого укрытия.

3. В технической характеристике оборудования необходимо указывать:

- количество воздуха, подлежащего удалению, м<sup>3</sup>/ч;
- аэродинамическое сопротивление встроенных воздухоприемников и воздуховодов, Па;

– количество вредных веществ в удаляемом вентиляцией воздухе, мг/м;

– коэффициент улавливания местным воздухоприемником.

Данные определяются согласно расчетам и уточняются при испытании опытного образца.

### **2.6.2. Исходные данные для определения количества выделяющихся вредных веществ**

1. Удельные выделения аэрозоля свинца при лужении и пайке оловянно-свинцовыми припоями ПОС-40 и ПОС-61 ориентировочно следующие:

– пайка электропаяльниками мощностью 20 – 60 Вт: 0,02 – 0,04 мг/100 паяк;

– лужение погружением в припой (отнесено к поверхности ванны): 300 – 500 мг/(м<sup>2</sup> · ч);

– лужение и пайка волной (отнесено к поверхности волны): 3000 – 5000 мг/(м<sup>2</sup> · ч).

2. Остатки паяльного флюса после операций лужения и пайки содержат свинец, который может поступать в воздух помещения. Остатки флюса от 100 паяк, проведенных электропаяльником, содержат до 0,4 мг свинца.

3. Дисперсный состав аэрозоля в воздухе, образующегося при пайке ПОС-40, приведен в табл. 29.

*Таблица 29. Дисперсный состав аэрозоля, образующегося при пайке ПОС-40*

Размер частиц, мкм	Частицы меньше данной фракции		Частицы данной фракции, %	Распределение частиц по массе, %	Скорость витания, см/с
	шт./л	%			
7	40	0,4	0,4	20,0	0,700
4	20	1,2	0,8	19,5	0,220
2	1000	10,0	8,8	34,6	0,00
1,5	2500	25,0	15,0	11,8	0,030
1,0	6000	60,0	35,0	10,0	0,015
0,9	8000	80,0	20,0	2,6	0,012
0,8	9000	90,0	10,0	0,9	0,009
0,7	10000	100,0	10,0	0,6	0,007

4. Количество окиси углерода, выделяющейся при изоляции при температуре 800 – 900 °С, можно принимать по табл. 30.

*Таблица 30. Количество окиси углерода, выделяющейся при изоляции при температуре 800 – 900 °С*

Материал	Количество, мг/г	Материал	Количество, мг/г
Винипласт	240	Хлопок	100
Полихлорвинил	180	Шелк	200
Полиэтилен	100	Шелк и винипласт	190
Фторопласт	100		

При обжиге фторопластовой изоляции на 1 г изоляции выделяется 3 мг фтористого водорода.

5. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны приведены в табл. 31.

*Таблица 31. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны*

Вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Вещество	ПДК, мг/м <sup>3</sup>
Свинец и его неорганические соединения	0,01/0,007*	Этилацетат	0,0/0,02*
Окись кадмия	0,1	Окись углерода	200
Свинец + кадмий	0,005 (по свинцу)	Фтористый водород	200
Окись олова	10,0	Этиловый спирт	1000

\* Среднесменная ПДК

### ***2.6.3. Исходные данные для конструирования и расчета местной вентиляции установок пайки и лужения***

1. Всасывающее отверстие воздухоприемника следует располагать на минимальном расстоянии от источника выделения вредных веществ, допустимом по конструктивным и технологическим соображениям. При этом следует учитывать особенности выделения вредных веществ. Характерные схемы местных вытяжных устройств, встроенных в технологическое оборудование радио- и электронной промышленности, приведены на рис. 25.

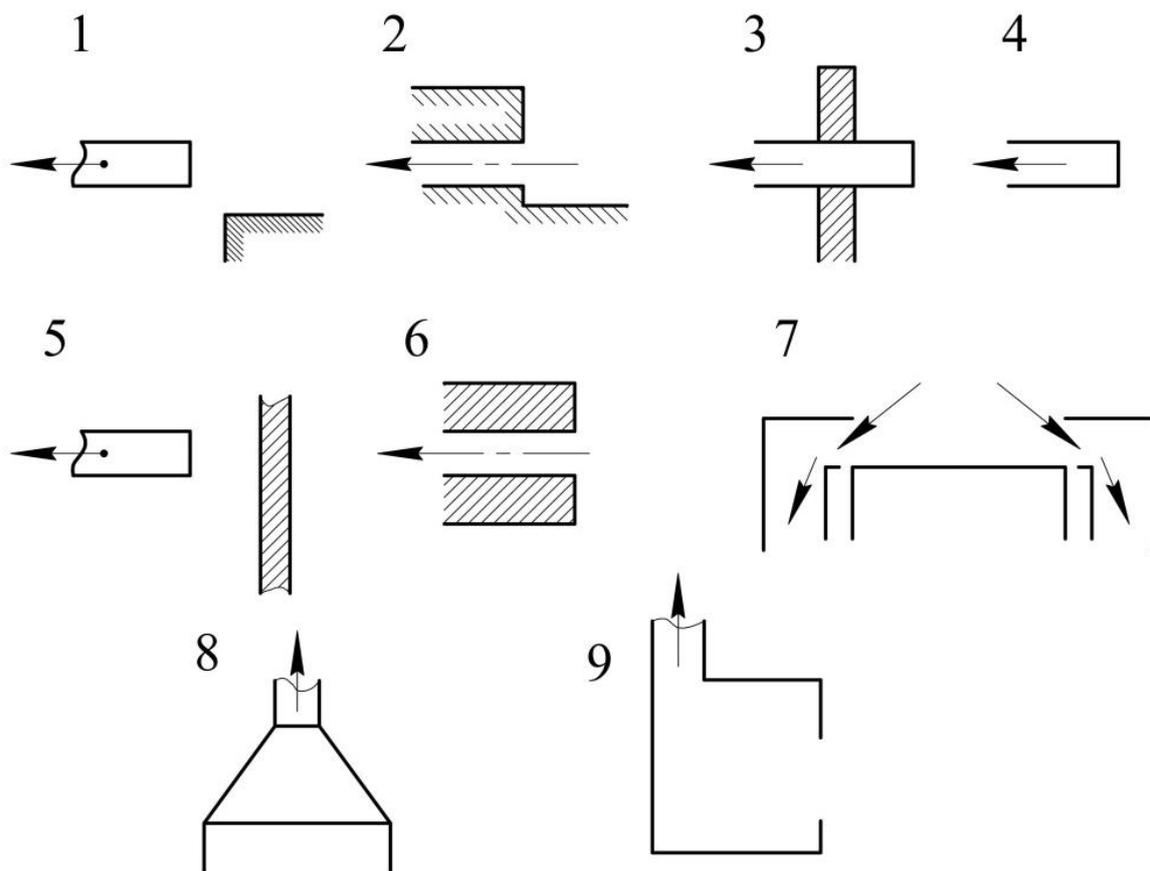


Рис. 25. Схемы воздухоприемников, встроенных в технологическое оборудование: 1 – полуавтомат для лужения выводов микросхем модели ПЛП; 2 – автомат для лужения выводов микросхем модели АЛП-1; 3 – полуавтомат для пайки микросхем модели АПМ-Г; 4 – автомат для пайки микросхем; 5 – модель струйной обработки пленочного фоторезиста; 6 – автомат для лужения выводов модели АА-2; 7 – автоматическая линия электрической обработки печатных плат типа АГ-38; 8 – установка для нанесения пленочного фоторезиста КЛМЗ; 9 – установка для лакировки субблоков

2. В полуавтоматах лужения и пайки по конструктивным соображениям рекомендуется предусматривать щелевые бортовые отсосы. Всасывающее отверстие отсоса следует располагать на уровне источника выделения вредных веществ.

3. При конструировании воздухоприемников необходимо предусматривать поверхности, ограничивающие зону подтекания воздуха и тем самым увеличивающие эффективность улавливания вредных веществ.

4. Количество воздуха, которое следует удалять через местные отсосы  $L$ , м<sup>3</sup>/ч, определяется по формуле

$$L = 3600F_0v_x/v, \quad (218)$$

где  $F_0$  – площадь воздухоприемного отверстия, м<sup>2</sup>;

$v_x$  – нормируемое значение скорости в месте выделения вредных, м/с;

$v$  – относительная скорость в расчетной точке вытяжного факела, в которой необходимо обеспечить за счет работы местного отсоса скорость  $v_x$ .

5. Значения скоростей  $v_x$  рекомендуется принимать: при расположении вытяжного отверстия над конвективным потоком, выносящим вредности в помещение, – 0,3 м/с; при расположении вытяжного отверстия сбоку от конвективного потока над ванной с флюсом – 0,3 м/с; над ванной с оловянно-свинцовым припоем – 0,4 м/с.

6. Для прямоугольного отверстия относительная скорость определяется в зависимости от относительных координат

$$\bar{x} = \frac{x}{b_0}; \quad \bar{y} = \frac{y}{b_0}; \quad \bar{z} = \frac{z}{b_0} \text{ и соотношения сторон } n = \frac{a_0}{b_0},$$

где  $x, y$  – координаты расчетной точки;

$a_0$  – половина большей стороны отверстия;

$b_0$  – половина меньшей стороны отверстия.

Значения  $v$  находятся: для отверстия с острой кромкой (патрубок расположен свободно): при  $0 < \bar{X} < 4$  на рис. 26; при  $4 < \bar{X} < 8$  на рис. 27; для отверстия в стенке: при  $0 < \bar{X} < 4$  на рис. 28; при  $4 < \bar{X} < 8$  на рис. 29.

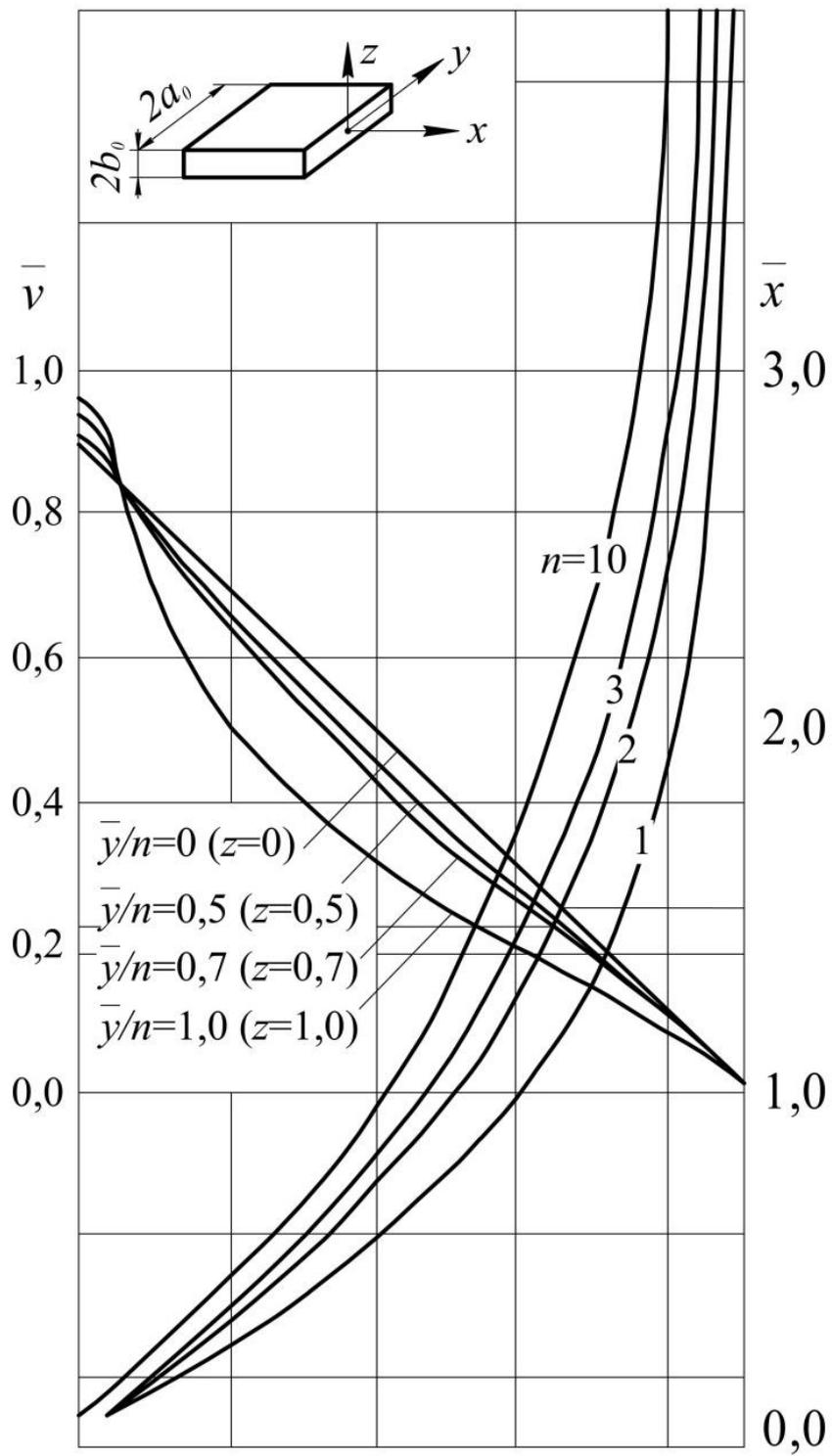


Рис. 26. Относительная скорость  $\bar{v}$  в спектре всасывании патрубке с острой кромкой при  $0 < \bar{X} < 4$

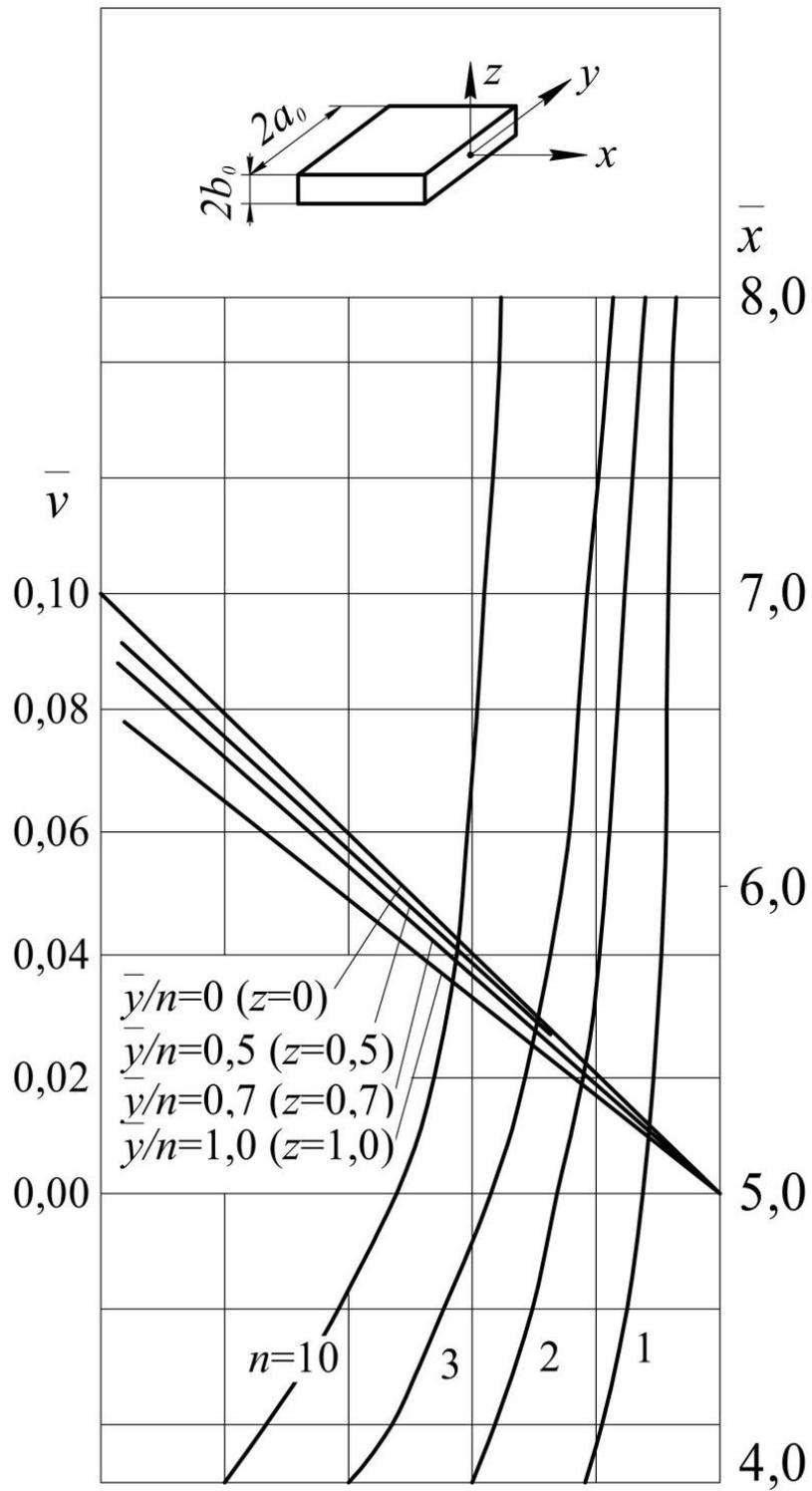


Рис. 27. Относительная скорость  $\bar{v}$  в спектре всасывании патрубку с острой кромкой при  $4 < \bar{X} < 8$

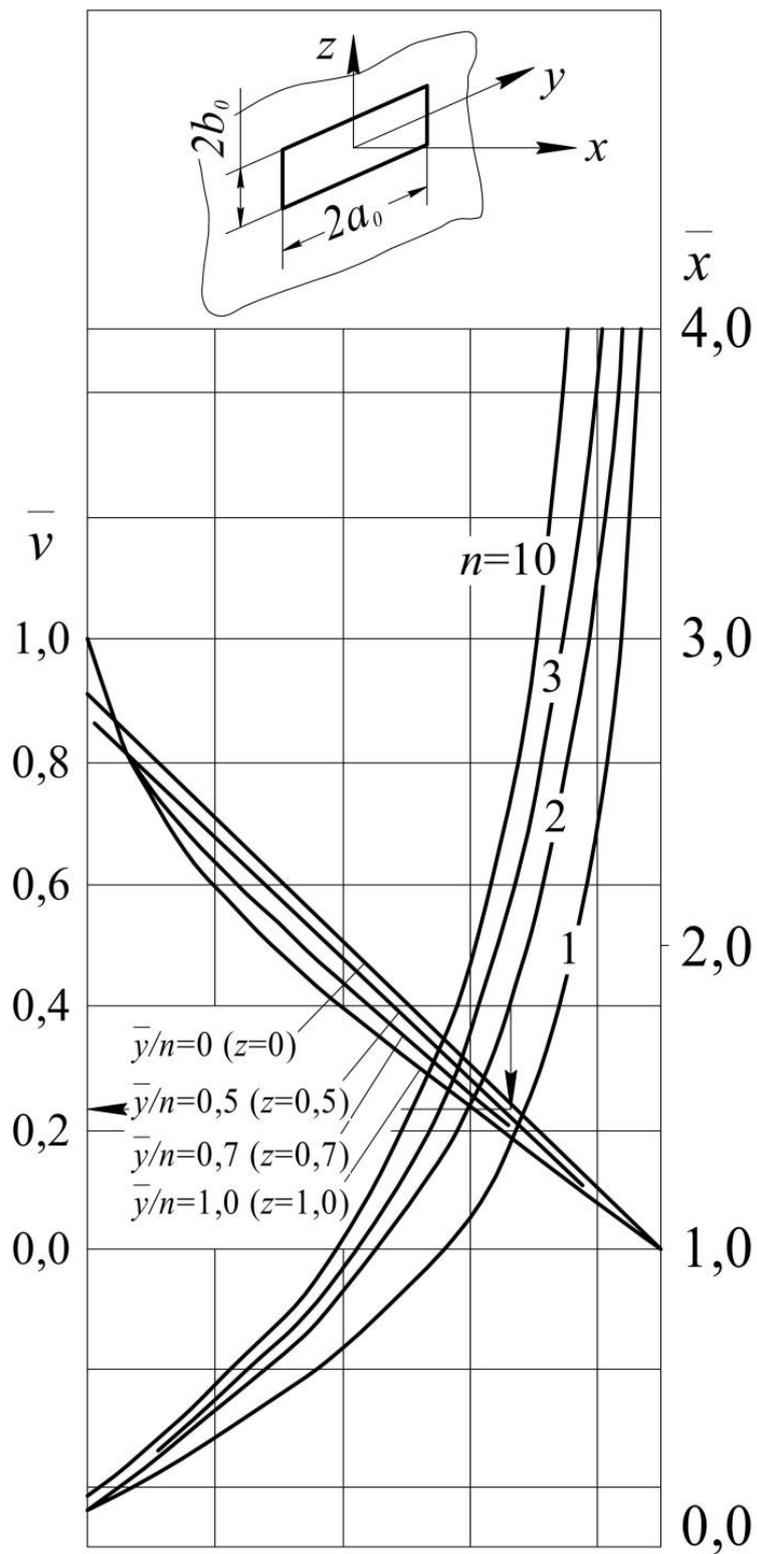


Рис. 28. Относительная скорость  $\bar{v}$  в спектре всасывании отверстия в стенке при  $0 < \bar{x} < 4$

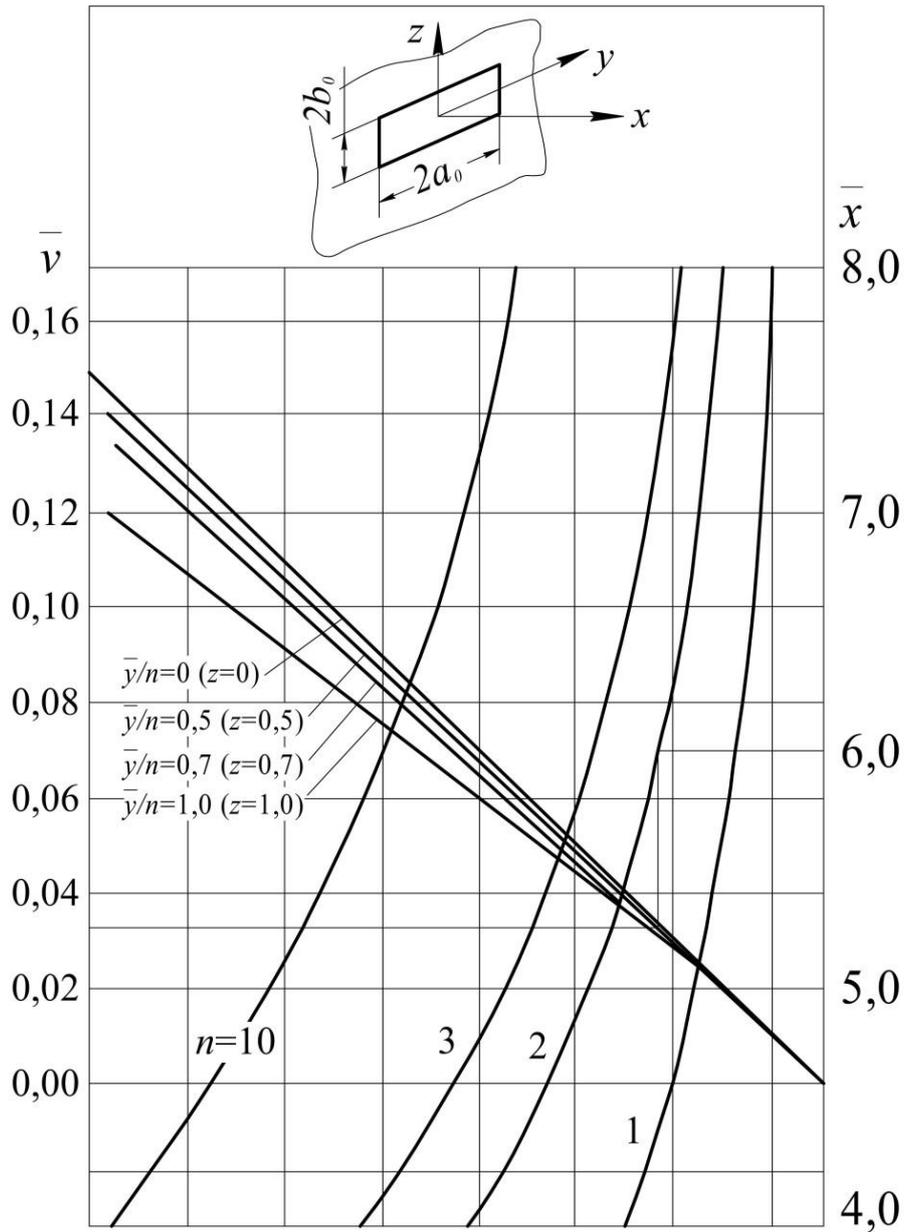


Рис. 29. Относительная скорость  $v$  в спектре всасывания отверстия в стенке при  $4 < \bar{x} < 8$

7. Для круглого вытяжного отверстия диаметром  $d_0$  относительная скорость  $v$  находится по графикам, изображенным на рис. 26 – 29, при относительных координатах  $\bar{x} = \frac{2,3x}{d_0}$ ;  $\bar{y} = 0$ ;  $\bar{z} = \frac{2,3z}{d_0}$  и значении  $n - 1$ .

8. Если относительные координаты точки удовлетворяют одному из условий  $\bar{x} > 8$ ;  $\bar{y} > 1$ ;  $\bar{z} > 1$ , то для круглого отверстия и прямоугольного при  $n < 10$  скорость определяется соотношением

$$\bar{v} = k \frac{d_3^2}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2}, \quad (219)$$

где  $d_0 = 2,3\sqrt{a_0 b_0}$  – для прямоугольного отверстия;

$d_3 = d_0$  – для круглого отверстия;

$k = 0,06$  – для отверстия с острой кромкой;

$k = 0,12$  – для отверстия в стенке;

при  $n \geq 10$

$$\bar{v} = k \frac{b_0}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{z}^2}}, \quad (220)$$

где  $k = 0,32$  – для отверстия с острой кромкой,  $k = 0,64$  – для отверстия в стенке.

9. Минимальная ширина козырька вокруг всасывающего отверстия, при которой следует пользоваться расчетными зависимостями для отверстия в стенке (см. рис. 28, 29), должна равняться:

для круглых отверстий – диаметру отверстия;

для квадратных и прямоугольных отверстий с соотношением сторон до 1:6 – наименьшему размеру отверстия ( $2b_0$ );

для щелей, т. е. прямоугольных отверстий,  $n \geq 10$  – утроенной высоте ( $6b_0$ ).

Если всасывающий патрубок выступает из плоскости козырька более чем на четверть диаметра при круглом сечении или более чем на четверть меньшей стороны при прямоугольном сечении, то козырек не оказывает влияния на скорость всасывания и ее следует определять как для патрубка с острой кромкой.

10. При наличии вблизи всасывающего отверстия поверхностей, ограничивающих подтекание воздуха, расчетная скорость вычисляется умножением относительной скорости, найденной в подп. 6 – 8 для соответствующих точек при отсутствии плоскости, на коэффициент влияния плоскости  $\psi$ .

11. Коэффициент  $\psi$  находится по рис. 30 для круглого и прямоугольного отверстий с  $n \leq 10$  и по рис. 31 для прямоугольного отверстия с  $n > 10$ .

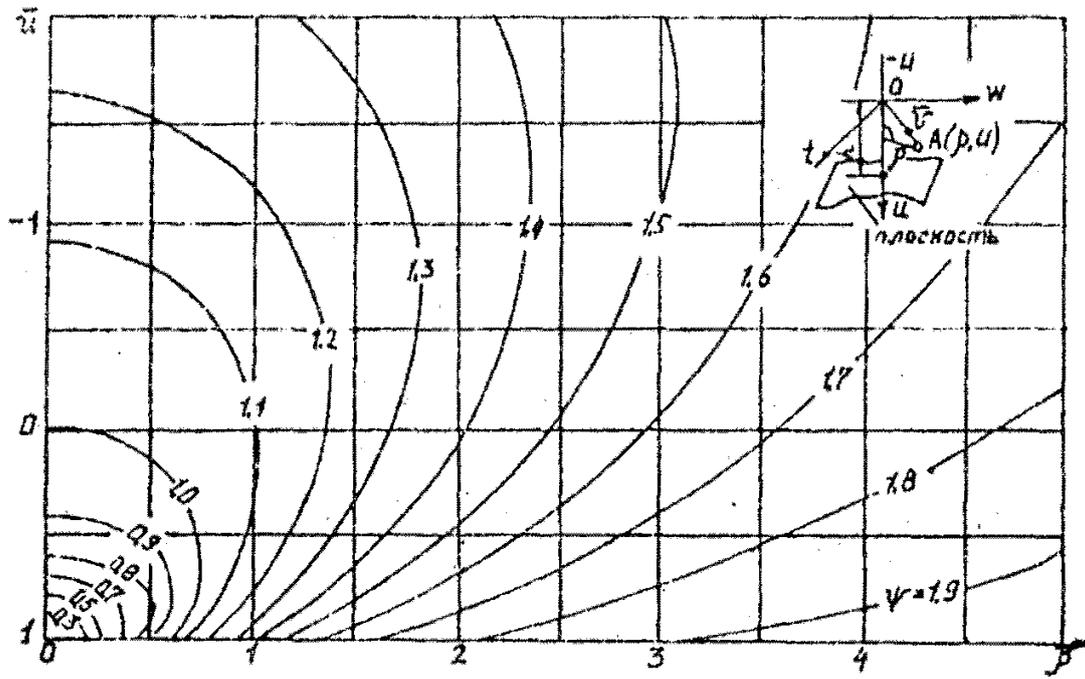


Рис. 30. Коэффициент влияния плоскости для круглого и прямоугольного отверстий с  $n \leq 10$

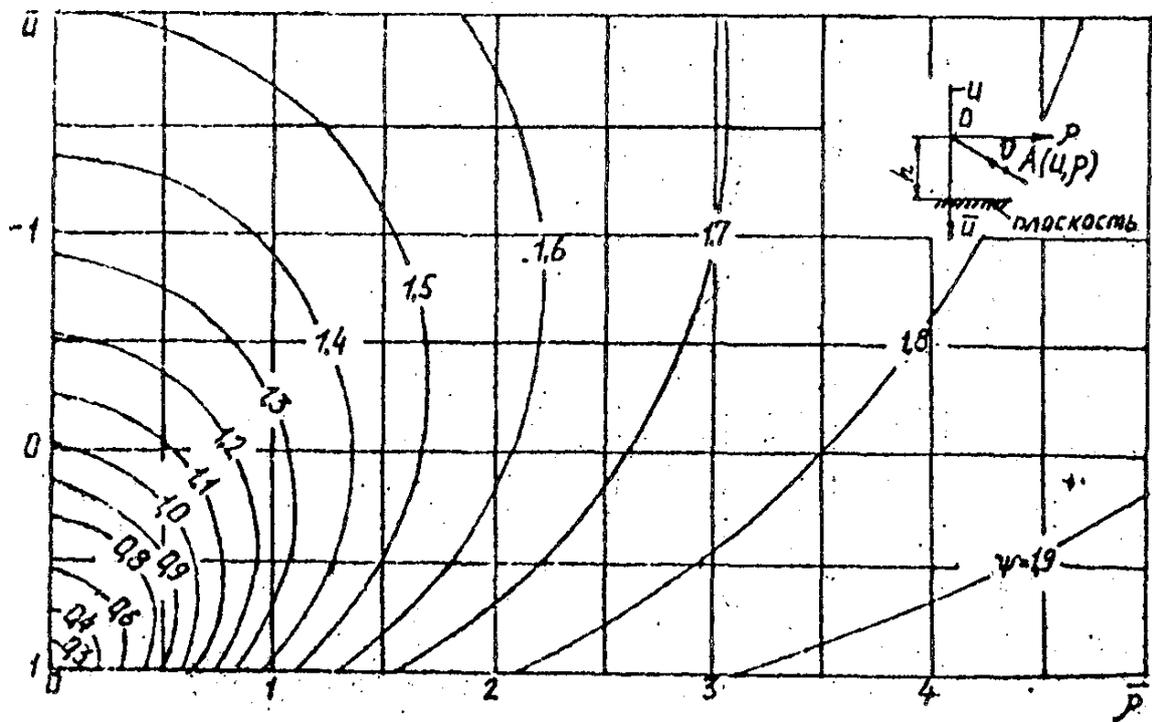


Рис. 31. Коэффициент влияния плоскости для прямоугольного отверстия с  $n > 10$

Расположение и обозначение координатных осей при определении  $\psi$  приведено на графиках: начало координат располагается в центре всасывающего отверстия, а ось  $u$  направлена перпендикулярно ограничивающей плоскости.

Графики построены в относительных координатах:

$$\bar{u} = \frac{u}{h}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{h}.$$

Значение величины  $\rho = \sqrt{\omega^2 + t^2}$  в случае круглого и прямоугольного отверстий с  $n \leq 10$  и  $\rho = \omega$  для прямоугольного отверстия с  $n > 10$ ,  $h$  – расстояние от центра всасывающего отверстия до ограничивающей плоскости.

Примечания:

1. Для точки с координатами  $\bar{\rho} \geq 5$  и  $1 \leq \bar{u} \leq 10$  принимать величину  $\psi = 2$ .

2. Если  $u < -2$  либо  $\bar{u} < 0$  и  $\bar{\rho} \leq 5$ , то коэффициент следует вычислять по формулам:

для круглого и прямоугольного отверстий с  $n \leq 10$

$$\psi = \sqrt{1 + \left[ \frac{\bar{\rho}^2 + \bar{u}^2}{\bar{\rho}^2 + (\bar{u} - 2)^2} \right]^2} + 2 \frac{(\bar{\rho}^2 + \bar{u}^2)^{1/2} [\bar{\rho}^2 + \bar{u}(\bar{u} - 2)]}{[\bar{\rho}^2 + (\bar{u} - 2)^3]^{3/2}}, \quad (221)$$

для прямоугольного отверстия с  $n > 10$

$$\psi = 2 \sqrt{\frac{\bar{\rho}^2 + (\bar{u} - 1)^2}{\bar{\rho}^2 + (\bar{u} - 2)^2}}. \quad (222)$$

12. Количество воздуха, подсчитанное по формулам, справедливо, если работа производится по оси отсоса или перпендикулярно к ней на расстоянии, не превышающем половины ширины отсоса. Если это расстояние составляет ширину отсоса, то для круглых, квадратных и прямоугольных отверстий с соотношением сторон до 1:6 количество удаляемого воздуха следует увеличить в 1,5 раза. Длина целевого отсоса должна равняться длине обслуживаемой зоны.

13. Местные отсосы могут быть совмещены с технологическим оборудованием или встроены в него, что находит все более широкое применение в отечественной и зарубежной практике, и не связаны с оборудованием. Они могут быть стационарными и нестационарными, подвижными и неподвижными. Эффективность местного отсоса может повышаться дополнительным устройством – поддувом.

Требования к местным отсосам:

а) должны обеспечивать требуемую по санитарным нормам чистоту воздуха на рабочем месте с помощью минимальных объемов удаляемого воздуха, удаляя загрязненный воздух кратчайшим путем, минуя зону дыхания работающих;

б) не должны мешать выполнению технологических операций, но должны препятствовать распространению вредных веществ по объему производственного помещения.

На рис. 32 представлены спектры всасывания для круглого и прямоугольного отверстий с острыми кромками, а на графике рис. 33 – кривая изменения относительной скорости.

Из графиков вполне очевидно, что воздухоприемные отверстия должны быть максимально приближены к источнику вредных выделений, так как создаваемая ими подвижность воздуха убывает примерно обратно пропорционально квадрату расстояния.

Любой местный отсос состоит из двух основных частей: пылегазоприемника и воздуховодов. Расчет местного отсоса (пылегазоприемника) сводится к определению скорости воздуха в приемном отверстии, конструктивное оформление которого (тип отсоса) выбирается в зависимости от конкретных технологических условий. Для этого нужно знать необходимую величину подвижности воздуха в источнике вредностей и расстояние от источника до отсоса, а также их взаимное расположение.

На рис. 34 и 35 в относительных координатах представлены спектры всасывания для наклонных панелей равномерного всасывания.

Для каждого типа отсоса определяется требуемая скорость воздуха в его сечении, заранее определенная экспериментально, с указанием максимально допустимого расстояния от приемного отверстия отсоса до источника вредностей. Если это расстояние не указано, то следует исходить из положения, что во всех случаях это расстояние не должно быть более одного гидравлического диаметра местного отсоса, определяемого как отношение площади отверстия к половине его периметра.

Устройство местной вытяжной вентиляции должно быть увязано с действием приточной общеобменной вентиляции, струи которой, восполняя удаляемый из цеха воздух, не должны разносить вредные вещества по помещению, т. е. не должны нарушать их всасывания местным отсосом.

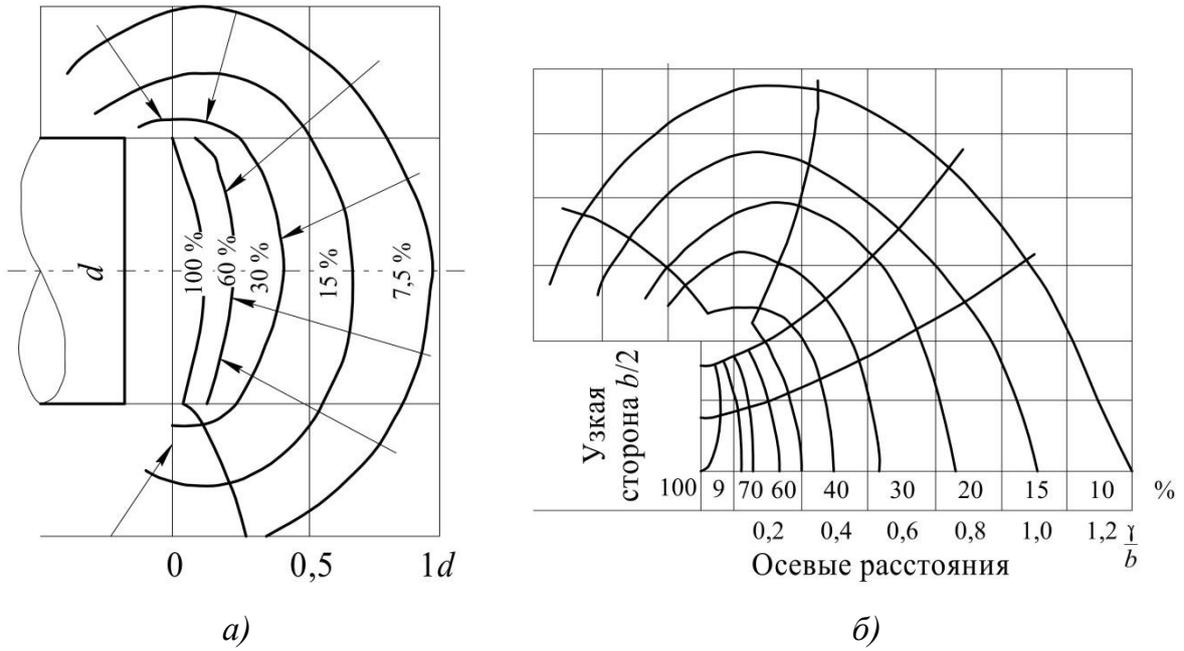


Рис. 32. Спектры всасывания отверстий с острыми кромками:  
 а – круглого; б – прямоугольного с соотношением сторон 1:2

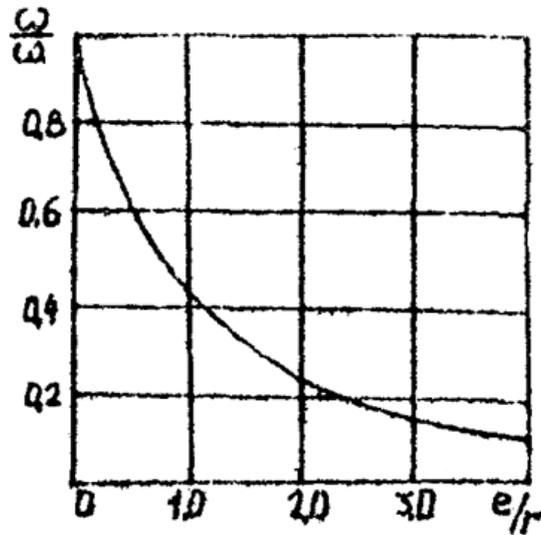


Рис. 33. График изменения осевых скоростей для прямоугольных отверстий:  
 e – расстояние от отверстия;  
 r – гидравлический радиус отверстия;  
 $\omega_0$  – средняя скорость в отверстии;  
 $\omega$  – осевая скорость

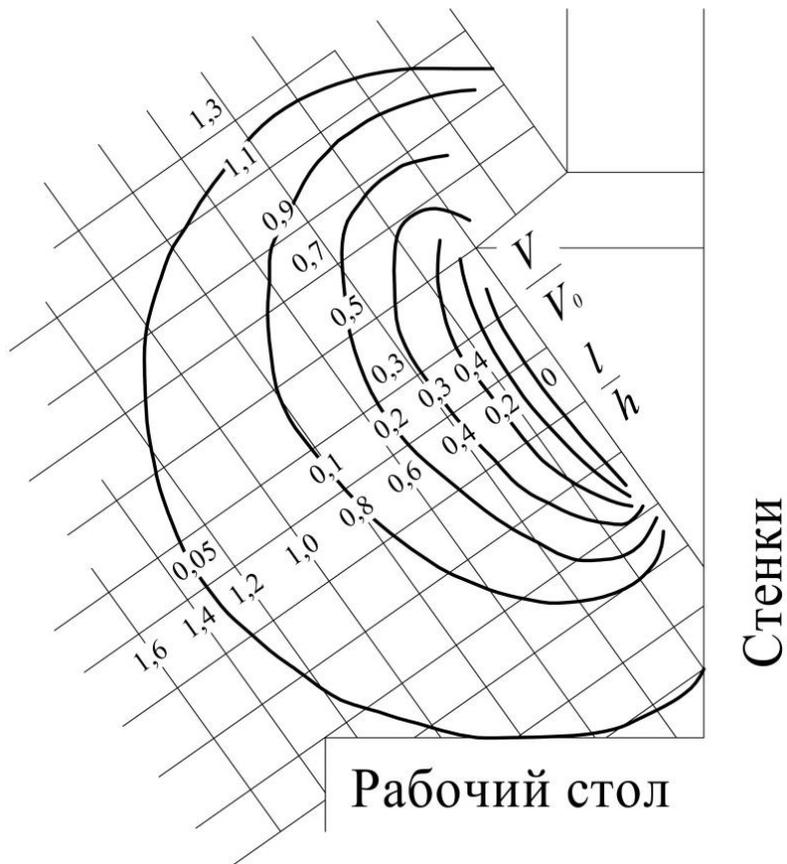


Рис. 34. Спектр всасывания наклонной панели без козырька

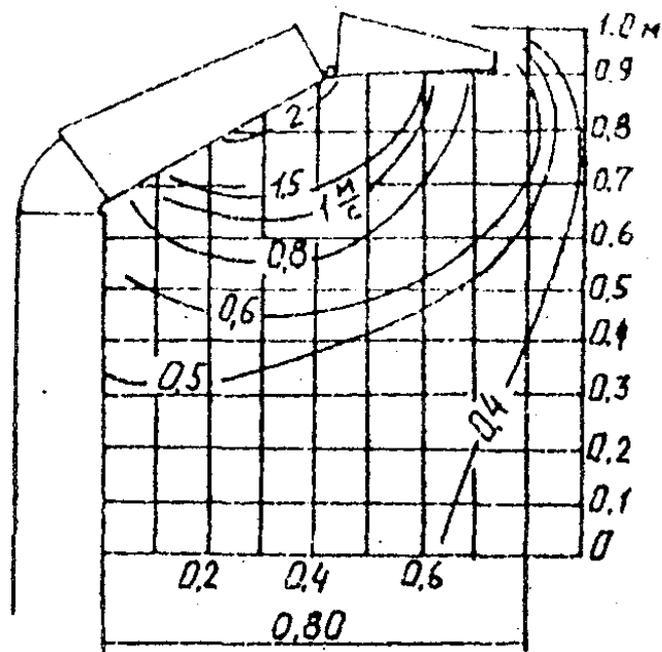


Рис. 35. Спектр всасывания наклонной панели с поворотным козырьком

14. При расположении оборудования в вентилируемом укрытии объем удаляемого воздуха определяется из условия обеспечения средней скорости в рабочем проеме. Скорость выбирается в зависимости от токсичности выделяющихся веществ, наличия тепловыделений и характера технологического процесса.

При лужении и пайке оловянно-свинцовыми припоями необходима скорость 1,3 м/с.

При флюсовании, удалении остатков флюса и маркировке элементов материалами, содержащими ароматические углеводороды, скорость 1 м/с.

При тех же процессах материалами, не содержащими ароматических углеводородов, скорость 0,6 м/с.

Острые кромки рабочего проема следует округлять.

15. При разработке местных отсосов, которые будут подключаться к общей вытяжной системе цеха, аэродинамическое сопротивление отсосов не должно превышать 400 – 500 Па (40 – 50 кг/м<sup>2</sup>).

16. Технологическое оборудование рекомендуется снабжать индивидуальными вентиляционными агрегатами. Давление, создаваемое вентилятором при необходимой производительности, должно быть на 200 – 250 Па (20 – 25 кг/м<sup>2</sup>) больше сопротивления встроенных воздухоприемников и воздуховодов для возможности подключения внешней сети воздуховодов. Величину избыточного давления следует указывать в технической характеристике технологического оборудования.

17. Поточные линии и группы автоматов рекомендуется снабжать фильтрами для очистки удаляемого воздуха. Для очистки воздуха от аэрозоля свинца и олова возможно применять выпускаемые промышленностью ячейковые фильтры типа ФяУ с заполнением фильтрующим материалом из стекловолокна. Степень очистки такими фильтрами 70 %. Допустимая удельная воздушная нагрузка 6000 м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup>. Санитарные нормы [20] не допускают рециркуляции воздуха, содержащего вредные вещества, относящиеся к I – III классам опасности. Поэтому воздух после очистки следует выбрасывать в атмосферу.

#### ***2.6.4. Данные для конструирования и расчета местной вентиляции оборудования по изготовлению печатных плат***

1. От модулей струйной обработки печатных плат рекомендуется удалять воздух на стыке модулей через воздухоприемники.

2. При работе с жидкими фоторезисторами, красками и так далее ориентировочное количество удаляемого воздуха при ширине конвейера 730 мм составляет, м<sup>3</sup>/ч:

- от модуля травления – 350;
- от модуля обезжиривания – 200;
- от модуля промывки в холодной воде – 200;
- от модуля промывки в горячей воде – 300;
- от модуля сушки – 350.

3. Над установками нанесения фоторезистора и другими установками, являющимися источниками значительных тепловыделений, при устойчивых конвективных потоках, имеющих осевую скорость на уровне всасывающего отверстия не менее 0,5 м/с, рекомендуется проектировать низкорасположенные зонты. Для улавливания потоков с меньшими скоростями и при скоростях движения окружающего воздуха 0,4 м/с и более зонт следует снабжать съемными или откидными фартуками с одной, двух или трех сторон и располагать его над источником на высоте не более 0,8 эквивалентного диаметра (по площади) источника тепла. Угол открытия зонта не должен превышать 60°.

4. Часовое количество воздуха, подтекающего к зонту с конвективной струей, возникающей над тепловым источником круглой или прямоугольной формы (при  $a/b \leq 1,5$ ), м<sup>3</sup>/ч,

$$L_k = 70^3 \sqrt{Q_k Z_k F_{\text{и}}}, \quad (223)$$

где  $Q_k$  – часовое количество тепла, выделяемого источником путем конвекции, Вт;

$Z_k$  – расстояние от нагретой поверхности до воздухоприемного сечения зонта, м;

$F_{\text{и}}$  – площадь источника, м<sup>2</sup>.

Значение  $Q_k$  определяется по формуле

$$Q_k = \alpha_k F_{\text{и}} (t_{\text{и}} - t_b), \quad (224)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);

$t_{\text{и}}$  – температура нагретой поверхности источника, °С;

$t_b$  – температура воздуха помещения, °С;

Количество воздуха, удаляемого через зонт:

$$L_3 = L_k \frac{F_3}{F_{\text{и}}}, \quad (225)$$

где  $F_3$  – площадь сечения зонта, м<sup>2</sup>, при  $Z_k < 2,8\sqrt{F_{\text{и}}}$  принимают  $F_3 = 1,5F_{\text{и}}$ .

5. Зонты в виде козырьков предусматривают у проемов сушил и другого аналогичного оборудования. Расход воздуха, поступающего под зонт – козырек из сушила,  $G$  кг/ч, вычисляют по формуле

$$G = 3600\mu F_{\Pi} \sqrt{0,8\gamma g \Delta p}, \quad (226)$$

а расход воздуха, удаляемого через зонт:

$$C_{уд} \geq 1,5GK_l, \quad (227)$$

при  $0,5 \leq \frac{l_1}{h} \leq 2, K_l = 1 + 0,07 \left(2 - \frac{l_1}{h}\right)^4$ ,

где  $\mu$  – коэффициент расхода, приблизительно равный 0,65;

$F_{\Pi}$  – площадь проема,  $m^2$ ;

$\gamma$  – удельная масса воздуха, выходящего из сушила,  $kg/m^3$ ;

$g$  – ускорение,  $m/s^2$ ;

$\Delta p$  – избыточное давление, под влиянием которого газы выходят из отверстия сушила, Па;

$h$  – высота проема сушила, м;

$l_1$  – величина вылета зонта, м.

6. В воздухоприемниках постоянного сечения скорость входа воздуха во всасывающее отверстие переменна и определяется по рис. 36.

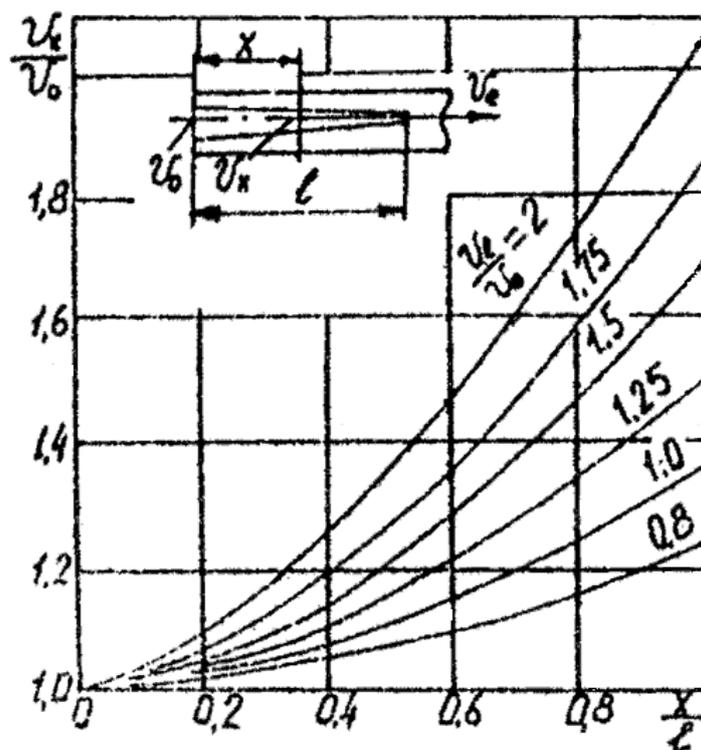


Рис. 36. График для расчета щели равномерного всасывания

На графике приняты следующие обозначения:

$V_k$  – скорость в щели на расстоянии  $X$ , м/с;  $V_0$  – скорость в щели при  $X = 0$ , м/с;  $l$  – длина щели, м;  $V_l$  – скорость в конце воздуховода, м/с.

Для получения равномерного удаления воздуха по длине всасывания предусматривают различную высоту воздухоприемного отверстия. Высоту щели  $b_x$  на расстоянии  $X$  находят по формуле

$$b_x = \frac{L}{3600V_k l} \quad (228)$$

7. Воздуховоды вытяжной вентиляции рекомендуется выполнять из материала, стойкого к щелочам и кислотам (винипласт, резина).

8. При корректировке положения печатных плат в модулях необходим подъем воздухоприемником на 50 – 80 мм. Для этого воздуховод должен иметь телескопическое соединение или изготавливаться из гибких шлангов.

9. На воздуховодах от воздухоприемников предусматривают шиберы.

10. Магистральные воздуховоды крепят к строительным ограждениям здания.

11. Характеристика местных отсосов от оборудования для изготовления двусторонних и многослойных печатных плат дана в табл. 32.

12. Количество воздуха, подлежащего удалению от модульных линий обработки печатных плат, приведено в табл. 33.

13. Количество воздуха, подлежащее удалению от модулей обработки печатных плат, приведено в табл. 34.

*Таблица 32. Характеристика местных отсосов от оборудования для изготовления двусторонних и многослойных печатных плат*

Технологический процесс	Оборудование	Местный отсос	Количество удаляемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Характерный размер воздухоприемника, рабочего проема, мм
Проявление рисунка	Установка для проявления пленочного фоторезиста, КИМЗ 258.003	Шкафное укрытие	360	700 × 200
	Насос	Кожух	100	–

Продолжение табл. 32

Технологический процесс	Оборудование	Местный отсос	Количество удаляемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Характерный размер воздухоприемника, рабочего проема, мм
Снятие фоторезиста	Установка для снятия пленочного фоторезиста APC2 950.000	Шкафное укрытие	360	700 × 200
	Насос	Кожух	100	–
Очистка растворов	Установка очистки растворов проявления КПМЗ 249.002	Щелевой отсос	400	600 × 40
		Воздушные трубки от емкостей выводятся в вытяжные воздуховоды		
Нанесение пленочного фоторезиста	Установка нанесения пленочного фоторезиста КПМЗ 289.003	Зонт на высоте 20 мм от верха установки	600	1050 × 500
Обработка плат по контуру	Станок для фрезерования плат по контуру КФС-01, ГГМЗ 102,001	Встроенный отсос		
	Фреза, диаметром 4 мм		40	10 × 40
	Фреза диаметром 6 мм		60	15 × 40
Заточка сверл	Станок заточный ЗС1-01, ГГМЗ, У05.001-01	Встроенный отсос	30	–
Травление печатных плат	Установка травления печатных плат ШЯМЗ 240.004	Отсос из сплошного укрытия	260	–
Химическая и электрохимическая обработка печатных плат АГ-38	Линия химической подготовки поверхности плат ГШМ1 210.003	Бортовые отсосы от 6 ванн и вытяжка от 2 сушил	2000	650 × 60
	Линия химической металлизации МПП и ЛП позитивным методом ГГМ1 210.006	Бортовые отсосы от 17 ванн, вытяжка от сушила	7200	650 × 80

Продолжение табл. 32

Технологический процесс	Оборудование	Местный отсос	Количество удаляемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Характерный размер воздухоприемника, рабочего проема, мм
Химическая и электрохимическая обработка печатных плат АГ-38	Линия химической металлизации МЛП и ПП позитивным комбинированным методом ГГМ1 210.007	Бортовые отсосы от 16 ванн, вытяжка от сушила	7200	650 × 80
	Линия химической металлизации ПП позитивным комбинированием ГГМ1 210.008	Бортовые отсосы от 14 ванн, вытяжка от сушила	5400	650 × 80
	Линия электрической металлизации ПП позитивным методом ГГМ1 211.001	Бортовые отсосы от 16 ванн, вытяжка от сушила	10000	650 × 80
Химическая и электрохимическая обработка печатных плат АГ-38	Линия электрической металлизации МПП и ПП позитивным методом ГГМ1 211.002	Бортовые отсосы от 19 ванн, вытяжка от сушила	13900	650 × 80
	То же, ГГМ1 211.003	Бортовые отсосы от 21 ванны, вытяжка от сушила	15600	650 × 80
	Линия электрической металлизации МПП и ПП позитивным и комбинированным методами ГГМ1 211.004	Бортовые отсосы от 12 ванн, вытяжка от сушила	8300	650 × 80

Технологический процесс	Оборудование	Местный отсос	Количество удаляемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Характерный размер воздухоприемника, рабочего проема, мм
Химическая и электрохимическая обработка печатных плат АГ-38	То же, ГГМ1 211.005	Бортовые отсосы от 15 ванн, вытяжка от сушила	11200	650 × 80
	То же, ГГМ1 211.006	Бортовые отсосы от 17 ванн, вытяжка от сушила	13100	650 × 80
Химическая и электрохимическая обработка печатных плат	Гальванические ванны типов Н-90 01/08; Н-91 01/08; Н-92 01/08; Н-92 09/16; Н-94 01/08 Н-96 09/13 и др.	Бортовые отсосы	Определяются расчетом	

Таблица 33. Количество воздуха, удаляемого местной вытяжной вентиляцией от модульных линий обработки печатных плат

Модульные линии	Количество удаляемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч
Линии подготовки слоев перед прессованием	1900
Струйной обработки для химической подготовки печатных плат перед нанесением фоторезиста	3000
Струйной обработки для улавливания фоторезиста	1300
Щелочного травления	1600
Травления хлорным железом и обезжиривания	2000
Щелочного травления и промывки	1500
Снятия фоторезиста	3000
Проявления фоторезиста	3000
Химической подготовки поверхности слоев перед прессованием	5300

Таблица 34. Количество воздуха, удаляемого местной вытяжной вентиляцией от модулей обработки печатных плат

Модули обработки	Месторасположение отсоса	Количество удаляемого воздуха, м <sup>3</sup> /ч
Модули появления пленочного фоторезиста	В зоне загрузки и выгрузки	140
	В нижней части установки	650
Снятия пленочного фоторезиста	В зоне загрузки и выгрузки	140
	В нижней части установки	650
Воздушной сушки горячим воздухом	Внутри укрытия в зоне загрузки и выгрузки	600
Струйного травления в хлорном железе	Внутри укрытия модуля*	320
Обезжиривания и декапирования	То же	200
Окончательной промывки в холодной воде	>>	200
Промывки в горячей воде	>>	300
Сушки	>>	320

\* При технологическом процессе, допускающем удаление воздуха из укрытия модуля.

### 2.6.5. Пример расчета

Необходимо предусмотреть вентиляцию полуавтомата для лужения выводов, имеющего по две пары ванн флюсования и лужения. Размеры ванн в плане 100 × 50 мм, флюс канифольно-спиртовой, припой оловянно-свинцовый (см. табл. 32, 33, 34). При работе с оловянно-свинцовыми припоями выделяется аэрозоль свинца (2.6.2 п. 1); ванны флюсования могут быть источником выделения паров этилового спирта. В связи с фиксированными местами выделения вредных веществ предусматривается устройство местных отсосов, встроенных в полуавтомат (2.6.3 п. 2).

Каждая ванна снабжается отсосом в виде прямоугольного отверстия длиной, равной соответствующему размеру ванны, т. е. 100 мм. Учитывая конструктивные возможности, отсос располагают на расстоянии 75 мм от дальнего края ванны. Низ воздухоприемника находится на уровне ванны. Пространство между ванной и отсосом заполнено оборудованием. Всасывающее отверстие заделано в плоскость, перпендикулярную оси всасывания.

По конструктивным соображениям принимаем высоту отверстия равной 20 мм. Размеры плоскости, перпендикулярной оси всасывания, принимаются согласно 2.6.3. п. 9 равными 20 мм. Скорость воздуха, которую должен создать местный отсос на краю ванны, согласно 2.6.3. п. 5 должна равняться для ванн с оловянно-свинцовыми припоями 0,4 м/с, для ванн с флюсами – 0,3 м/с.

В нашем примере имеем:

$$2a_0 = 100 \text{ мм}; 2b_0 = 20 \text{ мм}; F_0 = 0,002 \text{ м}^2;$$

$$\Pi = \frac{2a_0}{2b_0} = \frac{100}{20} = 5; X = 75 \text{ мм}; Y = 0; Z = b_0 = 10 \text{ мм};$$

$$\bar{X} = \frac{x}{b_0} = \frac{75}{10} = 7,5; \bar{Y} = 0; \bar{Z} = \frac{z}{b_0} = 1.$$

На номограмме (см. рис. 29) имеем  $\bar{V} = 0,06$ . В связи с наличием плоскостей, ограничивающих подтекание воздуха, полученную величину  $\bar{V}$  необходимо умножить в соответствии с 2.6.3 п. 10 на коэффициент влияния плоскости  $\psi$ .

В нашем случае  $U = h = b_0 = 10 \text{ мм}$ ,  $\rho = 75 \text{ мм}$ . Для значений  $\bar{U} = u/h = 1$ ;  $\bar{\rho} = \rho/h = 7,5 \text{ мм}$  принимаем  $\psi = 2$  в соответствии с примечанием 2.6.3. п. 11.

Следовательно, величина относительной скорости будет равняться  $\bar{V} = 0,06 \cdot 2 = 0,12$ , количество воздуха, которое необходимо удалять от ванны лужения,  $L = 3600 \cdot 0,002(0,4 : 0,12) = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$ , от ванны флюсования  $L = 3600 \cdot 0,002(0,3 : 0,12) = 18 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Всего от полуавтомата необходимо удалять  $84 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха. Потери давления на местные сопротивления составляют 244 Па. Потери давления в воздухопроводах на трение при длине их 1,6 м составляют 1,6 – 14 и 22 Па. Следовательно, аэродинамическое сопротивление встроенного отсоса составит 266 Па.

Лужение производится волной, поверхность которой в каждой ванне равняется  $0,005 \text{ м}^2$ . Основываясь на данных, приведенных в 2.6.2. п. 1, количество свинца, которое будет выделяться полуавтоматом и выбрасываться вентиляцией в атмосферу, составит  $0,005 \times 4000 \cdot 2 = 40 \text{ мг}/\text{ч}$ .

Концентрация свинца в воздухе, удаляемом от свинцовых ванн,  $40 : 24 : 2 = 0,83 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

В технической характеристике оборудования необходимо указать согласно 2.6.1. п. 3 количество удаляемого воздуха – 84 м<sup>3</sup>/ч; аэродинамическое сопротивление встроенного отсоса – 266 Па; количество свинца, удаляемого вентиляцией, – 40 мг/ч; концентрация свинца в удаляемом воздухе – 0,83 мг/м<sup>3</sup>.

На рис. 37 показана конструкция местного отсоса (одного из имеющихся).

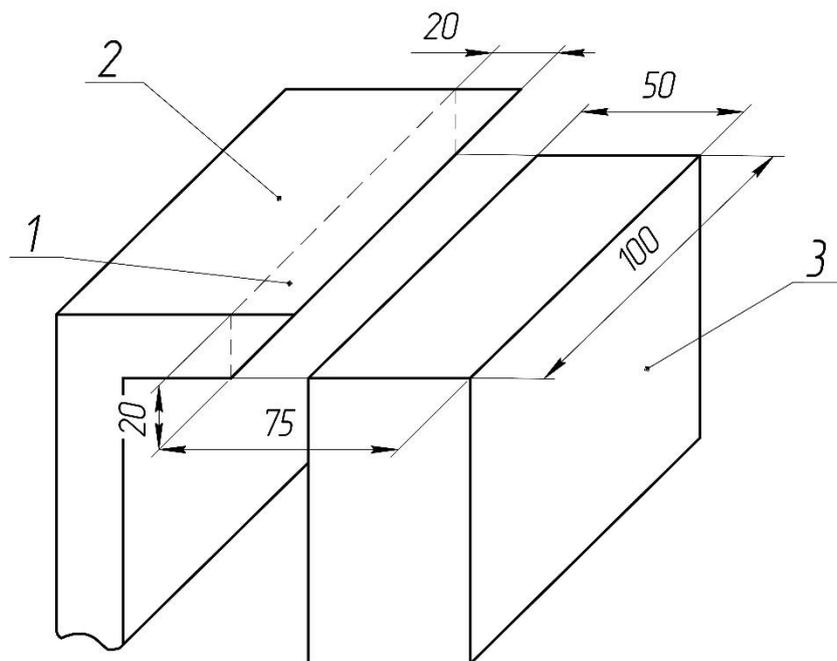


Рис. 37. Конструкция местного отсоса от ванн с оловянно-свинцовыми припоями: 1 – козырек; 2 – местный отсос; 3 – ванна

## 2.7. Подбор циклонов АО «НИИОГАЗ» для очистки выбросов предприятий от пыли

### 2.7.1. Общие положения

#### 1. Характеристика пыли и пылеулавливающих устройств

Пыль – это твердые частицы размером до 100 мкм, способные находиться в воздухе или в промышленных газах длительное время во взвешенном состоянии. В процессах пылеулавливания весьма важное значение имеют такие физико-химические характеристики пыли, как дисперсный (фракционный) состав, плотность, смачиваемость, электрическая заряженность частиц и др.

Для правильного выбора пылеулавливающих устройств необходимо прежде всего иметь сведения о дисперсном составе пыли, т. е. степени ее измельчения. Дисперсный состав пыли можно представить в виде таблиц, графиков или аналитических выражений. Распределение частиц по размерам может быть различным, однако для большинства промышленных пылей оно удовлетворительно согласуется с логарифмическим нормальным законом распределения Гаусса. В этом случае дисперсный состав пыли будет характеризоваться двумя величинами:

1) медианой распределения, или медианным диаметром частиц. В качестве этого параметра принимается диаметр частиц пыли, при котором масса всех частиц меньше этого диаметра и составляет 50 % общей массы пыли. Медиана распределения обозначается  $d_{50}$ ;

2) показателем полидисперсности (или просто дисперсией).

Дисперсия определяется из выражения

$$\sigma = \frac{d_{50}}{d_{16}} = \frac{d_{84}}{d_{50}}, \quad (229)$$

где  $d_{16}$ ,  $d_{84}$  – диаметры частиц, при которых масса частиц, меньших  $d_{16}$ ,  $d_{84}$ , составляет соответственно 16 и 84 % общей массы пыли.

Плотность частиц пыли так же, как и размер частиц, влияет на скорость их витания в воздухе. Кроме указанной плотности различают кажущуюся и насыпную плотность пыли. Кажущаяся плотность частицы представляет собой отношение ее массы к объему. Для непористых частиц значение кажущейся плотности численно совпадает с истинной плотностью. Насыпная плотность слоя пыли равна отношению массы слоя пыли к его объему и зависит не только от пористости частиц, но и от процесса формирования пылевого слоя. Насыпная плотность слежавшейся пыли в 1,5 – 2 раза больше, чем у свеженасыпной. Насыпная плотность слоя необходима для вычисления объема бункера, в который пыль поступает из пылеулавливающего устройства.

Смачиваемость частиц жидкостью (водой) влияет на работу мокрых пылеуловителей, а электрическая заряженность частиц – на их поведение в пылеуловителях и газоходах. Адгезионные свойства пылей определяют склонность частиц пыли к слипаемости, которая влияет на эксплуатационные параметры видов пыли и их способность к воспламенению и взрыву. Некоторые характеристики промышленных пылей приведены в табл. 35.

Таблица 35. Характеристика некоторых видов промышленной пыли

Наименование пыли и место оборудования	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Медиана распределения $d_{50}$ , мкм	Дисперсия $\sigma$	Распределение фракций по массе, %					
				0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	> 60
Формовочная земля литейного цеха	2320	16	2,01	8,58	11,52	43,1	29,21	4,01	3,68
Горелая земля от выбивных решеток	2420	4	3,1	69,12	2,56	5,42	10,0	9,4	3,48
То же у места пересылок с ленты на ленту	2130	27	1,7	6,0	7,06	30,39	38,83	14,92	2,8
Абразивная пыль заточных станков	3600	21	3,7	13,04	12,06	22,8	22,92	21,74	7,44
Летучая зола при сжигании угля в топках	1670	20	3,0	–	25,6	24,50	23,0	11,9	15,0
Сварочная аэрозоль при сварке электродами УОНИ	4350	5,2	2,8	49,8	14,4	28,6	4,0	2,6	6,6
Песчаная пыль от пескоструйных аппаратов	2600	29	2,4	6,0	12,0	6,8	32,8	8,4	34,0
Пыль асфальтобетонного завода (сушка инертных заполнителей в барабанной печи)	2600	20	5	7,8	15,2	41,0	20,0	10,2	5,8

Промышленные выбросы очищают от пыли с помощью различных устройств.

Пылеуловители и фильтры характеризуются рядом показателей:

– производительностью (пропускной способностью аппарата) – объем воздуха, который пылеулавливающее устройство способно очистить в единицу времени ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ). Пористые и матерчатые фильтры характеризуются не производительностью, а ее аналогом – воздушной удельной нагрузкой, представляющей собой объем очищаемого воздуха в единицу времени, приходящийся на единицу площади,  $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ ;

– общим коэффициентом очистки воздуха (общей эффективностью пылеулавливания аппарата) – отношение массы уловленной пыли к массе поступившей пыли за единицу времени. Коэффициент очистки определяется по одной из нижеприведенных формул:

$$\eta = 100 \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{вх}}}, \quad (230)$$

$$\eta = 100 \frac{G_{\text{ун}}}{(G_{\text{ул}} + G_{\text{ун}})}, \quad (231)$$

$$\eta = 100 \frac{(G_{\text{вх}} + G_{\text{ун}})}{G_{\text{вх}}}, \quad (232)$$

где  $G_{\text{вх}}$ ,  $G_{\text{ун}}$ ,  $G_{\text{ул}}$  – масса пыли, поступающей в пылеуловитель с загрязненным воздухом, уловленная в нем и унесенная с отходящим воздухом соответственно,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;

– фракционным коэффициентом очистки, который выражает эффективность пылеулавливания аппарата по отношению к отдельным фракциям пыли и определяется по выражению

$$\eta_{\text{фр}} = \frac{[\Phi_{\text{вх}} - \Phi_{\text{вых}}(1 - \eta)]}{\Phi_{\text{вх}}}, \quad (233)$$

где  $\Phi_{\text{вх}}$ ,  $\Phi_{\text{вых}}$  – содержание фракции пыли в воздухе соответственно на входе и выходе пылеуловителя, %;

– пылеемкостью, представляющей количество пыли, которое способно уловить и удержать устройство, измеряется в граммах или килограммах. Матерчатые фильтры характеризуются удельной пылеемкостью ( $\text{г}/\text{м}^2$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ), т. е. предельным количеством пыли, накопленной на единице площади фильтра;

– гидравлическим сопротивлением, которое представляет собой разность полных давлений на входе и выходе аппарата (Па). При расчетах

аппаратов гидравлическое сопротивление определяется в долях динамического давления по формуле

$$P = \xi P_{\text{доп}} = \frac{\xi \rho V^2}{2}, \quad (234)$$

где  $P_{\text{доп}}$  – динамическое давление, Па;

$\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$\rho$  – плотность воздуха при данной температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – скорость воздуха в поперечнике сечения аппарата, по отношению к которому принимается величина  $\xi$ , м/с.

Кроме указанных характеристик, пылеулавливающие устройства имеют экономические показатели: капитальные затраты, руб.; стоимость очистки воздуха на 1000 м<sup>3</sup> очищенного воздуха, руб.; расход электроэнергии (кВт · ч на 1000 м<sup>3</sup>), воды (л/м<sup>3</sup>), масла и т. д.

## 2. Устройство и принцип действия циклона

Циклоны относятся к сухим пылеуловителям, в которых отделение пылевых частиц от воздуха происходит за счет сил инерции, действующих на частицы при вращении пылегазового потока.

Циклоны представляют собой корпус цилиндрической или конической формы, в который встроена труба выходного патрубка. В верхней части корпуса имеется входной патрубок, смещенный относительно оси корпуса (рис. 38).

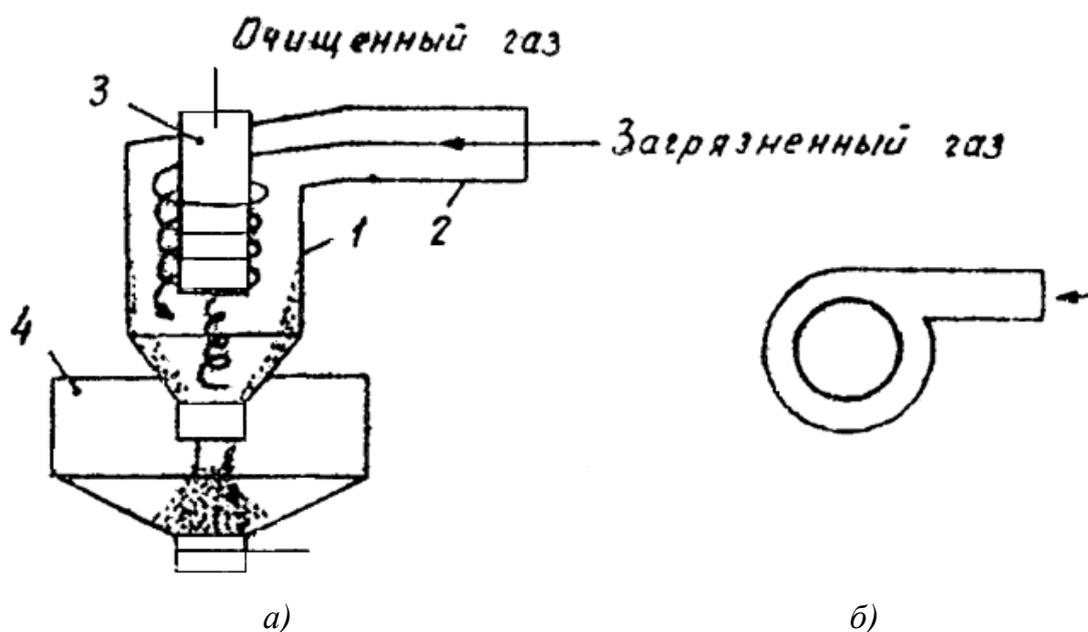


Рис. 38. Циклон: а – разрез; б – вид сверху

Газовый поток вводится в аппарат через патрубок 2 по касательной к внутренней поверхности корпуса 1 и совершает вращательно-поступательное движение вдоль корпуса к бункеру 4. Под действием центробежных сил частицы пыли образуют на стенке циклона пылевой слой, который попадает в бункер вместе с газом. Отделение частиц пыли от газа происходит частично в корпусе циклона, а частично в бункере за счет поворота газового потока, попавшего в бункер, на  $180^\circ$ . Освободившись от пыли, газовый поток образует вихрь, направленный вверх, и покидает циклон через трубу 3. Для нормальной работы циклона необходима герметичность бункера, в противном случае будет происходить подсос наружного воздуха, что способствует выносу пыли через выходную трубу.

Для высокой эффективности очистки необходимо обеспечить должную скорость движения газа в поперечном сечении циклона. При малой скорости движения газов инерциальные силы будут недостаточными для образования пылевого слоя у стенок корпуса циклона, и, следовательно, частицы пыли будут уноситься из циклона. С другой стороны, при очень большой скорости движения газа не будет происходить отделения частиц пыли от газового потока в бункере. Для циклонов разработки НИИОГАЗа рекомендуется принимать скорость, равную 2,5 – 4, 5 м/с.

Сравнительные испытания различных типов циклонов показали, что все практические задачи по очистке газов от пыли можно решить цилиндрическими (ЦН – 11, ЦН – 15, ЦН – 15У, ЦН – 24) и каноническими (СКД – ЦН – 33, СКД – ЦН – 31) циклонами НИИОГАЗа. Для указанных типов циклонов принят следующий ряд внутренних диаметров, мм: 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000.

Цилиндрические циклоны предназначены для улавливания сухой пыли из вентиляционных систем и золы из дымовых газов котельных и других технологических установок при начальной концентрации пыли от 0,3 до  $4000 \text{ г/м}^3$ . Избыточное давление газов, поступающих в циклон, должно превышать 2,5 кПа. Температура газов во избежание конденсации паров жидкости выбирается на  $30 - 50^\circ \text{C}$  выше точки росы, а по условиям прочности конструкции – не выше  $400^\circ \text{C}$ . Производительность циклонов зависит от их диаметра, увеличиваясь с ростом диаметра.

Конические циклоны типа СКД предназначены для очистки газов от сажи и обладают повышенной эффективностью очистки по сравнению с цилиндрическими циклонами серии ЦН, что достигается за счет большего гидравлического сопротивления циклонов серии СКД. Входная концентрация сажи на входе в циклон не должна превышать  $50 \text{ кг/м}^3$ . Внешний вид и типовые размеры в долях внутреннего диаметра  $D$  цилиндрических и конических циклонов НИИОГАЗа приведены на рис. 39 и в табл. 36 и 37. Для всех циклонов бункеры имеют цилиндрическую форму диаметром  $D_6 = 1,5D$  – для цилиндрических и  $D_6 = 1,2D$  для конических циклонов. Высота бункеров составляет  $0,8D$ , днище бункера выполняется под углом  $60^\circ$  в вершине конуса, выходное отверстие бункера имеет диаметр 250 или 500 мм.

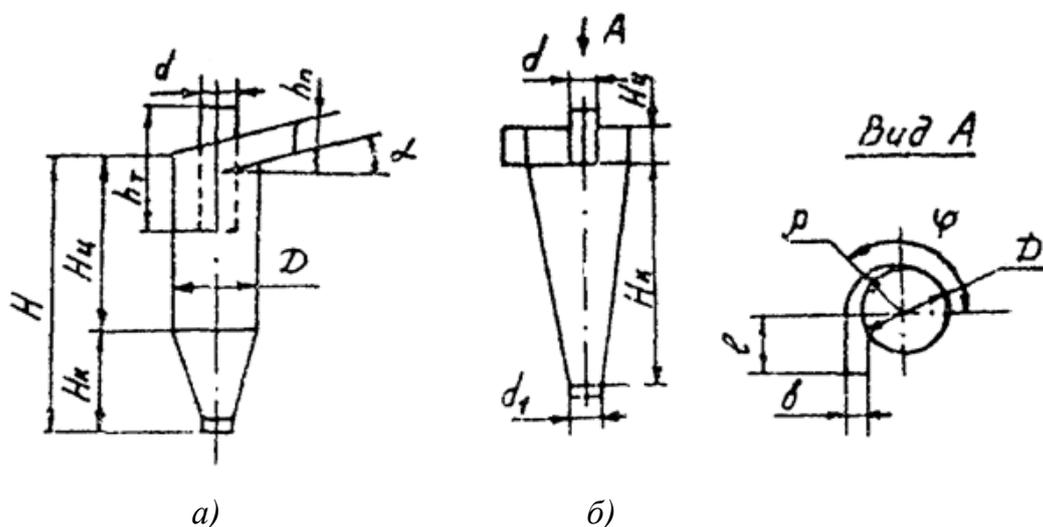


Рис. 39. Циклоны НИИОГАЗа: а – цилиндрический; б – конический

Таблица 36. Размеры цилиндрических циклонов НИИОГАЗа

Геометрический размер	Тип циклона			
	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11
Угол наклона крышки и входного патрубка циклона $\alpha$ , град	15	15	24	11
Высота входного патрубка $h_{п}$	0,66	0,66	1,11	0,48
Высота выхлопной трубы $h_{т}$	1,74	1,5	2,11	1,56
Высота цилиндрической части циклона $H_{ц}$	2,26	1,51	2,11	2,06
Высота конуса циклона $H_{к}$	2,0	1,50	1,75	2,0
Общая высота циклона $H$	4,56	3,31	4,26	4,38
Высота внешней части выхлопной трубы	0,3	0,3	0,4	0,3

Таблица 37. Размеры конических циклонов НИИОГАЗа

Геометрический размер	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СДК-ЦН-34	СДК-ЦН-34М
Высота цилиндрической части и высота заглубления выхлопной трубы $H_{ц}$	0,535	0,515	0,4
Высота конической части $H_{к}$	3,0	2,11	2,6
Внутренний диаметр выхлопной трубы $d$	0,334	0,340	0,22
Внутренний диаметр пылевывпускного отверстия $d_1$	0,334	0,229	0,18
Ширина входного патрубка $b$	0,264	0,214	0,18
Длина входного патрубка $l$	0,6	0,6	0,6
Текущий радиус улитки $\rho$	$\frac{\pi}{2} + \frac{8tg}{2\pi}$	$\frac{\pi}{2} + b$	$\frac{tg}{\pi}$

### 2.7.2. Методика расчета и подбора циклонов

1. Задавшись типом циклона по табл. 38, определяем оптимальную скорость газа в сечении циклона,  $\omega_{\text{опт}}$ , м/с.

Таблица 38. Расчетные параметры циклонов НИИОГАЗа

Параметр	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СДК-ЦН-34
$K$	41,4	41,4	41,4	46,9	34,97	34,97
$d_{50ц}$	2,47	3,06	3,48	4,71	1,428	1,297
$\delta_{ц}$	0,3979	0,3979	0,3979	0,3979	0,4281	0,4155
$\delta_{ц}^2$	0,158	0,158	0,158	0,158	0,183	0,1732
$\omega_{\text{опт}}$	3,5	3,5	3,5	4,5	2,5	2,5
$\xi$	250	160	170	80	600	1150

2. Вычисляем диаметр циклона по формуле, м

$$D = \sqrt{\frac{4L}{360\pi\omega_{\text{опт}}}}, \quad (235)$$

где  $L$  – количество очищаемого газа, м<sup>3</sup>/ч.

3. Полученное значение диаметра округляем до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона. Если расчетный диаметр превышает его максимально допустимое значение (3000 мм), то необходимо применять два или более параллельно установленных циклона.

4. По выбранному диаметру циклона находим действительную скорость движения газа в циклоне, м/с

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{4L}{3600\pi D^2 n'} \quad (236)$$

где  $n$  – количество параллельно работающих циклонов.

5. Задаем количество фракций и наибольший диаметр частиц в каждой фракции ( $d'$ ), для которых необходимо определять фракционные коэффициенты очистки.

6. Определяем величины  $X$  для каждой фракции по формуле

$$X = \frac{\lg \left( \frac{d'}{d_{50\text{ц}} K 10^3 \sqrt{\frac{D\mu}{\rho_n \omega_{\text{ц}}}}} \right)}{\delta_{\text{ц}}}, \quad (237)$$

где  $d_{50\text{ц}}$  – диаметр частиц, которые в условном циклоне улавливаются на 50 %, мкм (см. табл. 38);

$\delta_{\text{ц}}$  – характеристика полидисперсности циклона (см. табл. 38);

$\rho_n$  – плотность материала пыли, кг/м<sup>3</sup> (см. табл. 35);

$\mu$  – динамическая вязкость газа при заданной температуре. Динамическая вязкость воздуха при температуре 293 К равна  $18,1 \cdot 10^{-6}$  Па·с, а при температуре  $T$ :

$$\mu = \frac{18,1 \cdot 10^6 \cdot T}{293}; \quad (238)$$

$K$  – коэффициент, который зависит от типа циклона (см. табл. 38).

7. По табл. 39 определяем функцию логарифмически-вероятностного распределения для каждой фракции ( $\Phi(x)$ ).

Таблица 39. Функция логарифмически-вероятностного распределения

$X$	$\Phi(x)$	$X$	$\Phi(x)$	$X$	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	0,72	0,5285	1,43	0,8475
0,01	0,0080	0,73	0,5346	1,44	0,8501
0,02	0,0160	0,74	0,5407	1,45	0,8529
0,03	0,0239	0,75	0,5467	1,46	0,8557
0,04	0,0319	0,76	0,5527	1,47	0,8584
0,05	0,0399	0,77	0,5587	1,48	0,8611
0,06	0,0478	0,78	0,5646	1,49	0,8638
0,07	0,0558	0,79	0,5705	1,50	0,8664
0,08	0,0638	0,80	0,5763	1,51	0,8690

Продолжение табл. 39

$X$	$\Phi(x)$	$X$	$\Phi(x)$	$X$	$\Phi(x)$
0,09	0,0717	0,81	0,5821	1,52	0,8715
0,10	0,0797	0,82	0,5878	1,53	0,8740
0,11	0,0876	0,83	0,5935	1,54	0,8764
0,12	0,0955	0,84	0,5991	1,55	0,8789
0,13	0,1034	0,85	0,6047	1,56	0,8812
0,14	0,1113	0,86	0,6102	1,57	0,8836
0,15	0,1192	0,87	0,6157	1,58	0,8859
0,16	0,1271	0,88	0,6211	1,59	0,8882
0,17	0,1350	0,89	0,6265	1,60	0,8904
0,18	0,1428	0,90	0,6319	1,61	0,8926
0,19	0,1507	0,91	0,6372	1,62	0,8948
0,20	0,1585	0,92	0,6424	1,63	0,8969
0,21	0,1663	0,93	0,6475	1,64	0,8990
0,22	0,1741	0,94	0,6528	1,65	0,9011
0,23	0,1819	0,95	0,6579	1,66	0,9031
0,24	0,1897	0,96	0,6629	1,67	0,9051
0,25	0,1974	0,97	0,6680	1,68	0,9070
0,26	0,2051	0,98	0,6729	1,69	0,9090
0,27	0,2128	0,99	0,6778	1,70	0,9109
0,28	0,2205	1,00	0,6827	1,71	0,9127
0,29	0,2282	1,01	0,6875	1,72	0,9146
0,30	0,2358	1,02	0,6923	1,73	0,9164
0,31	0,2434	1,03	0,6970	1,74	0,9161
0,32	0,2510	1,04	0,7017	1,75	0,9199
0,33	0,2586	1,05	0,7063	1,76	0,9216
0,34	0,2661	1,06	0,7109	1,77	0,9233
0,35	0,2737	1,07	0,7154	1,78	0,9246
0,36	0,2812	1,08	0,7199	1,79	0,9263
0,37	0,2886	1,09	0,7243	1,80	0,9281
0,38	0,2961	1,10	0,7287	1,81	0,9297
0,39	0,3035	1,11	0,7330	1,82	0,9312
0,40	0,3108	1,12	0,7373	1,83	0,9328
0,41	0,3182	1,13	0,7415	1,84	0,9342
0,42	0,3255	1,14	0,7457	1,85	0,9357
0,43	0,3328	1,15	0,7499	1,86	0,9371
0,44	0,3401	1,16	0,7540	1,87	0,9385
0,45	0,3473	1,17	0,7580	1,88	0,9399
0,46	0,3545	1,18	0,7620	1,89	0,9412
0,47	0,3616	1,19	0,7660	1,90	0,9426
0,48	0,3688	1,20	0,7699	1,91	0,9439
0,49	0,3759	1,21	0,7737	1,92	0,9451

Окончание табл. 39

X	Φ(x)	X	Φ(x)	X	Φ(x)
0,50	0,3829	1,22	0,7775	1,93	0,9464
0,51	0,3899	1,23	0,7813	1,94	0,9476
0,52	0,3969	1,24	0,7850	1,95	0,9488
0,53	0,4039	1,25	0,7887	1,96	0,9500
0,54	0,4108	1,26	0,7923	1,97	0,9512
0,55	0,4177	1,27	0,7959	1,98	0,9523
0,56	0,4245	1,28	0,7995	1,99	0,9534
0,57	0,4313	1,29	0,8064	2,00	0,9545
0,58	0,4381	1,30	0,8029	2,05	0,9596
0,59	0,4448	1,31	0,8098	2,10	0,9643
0,60	0,4515	1,32	0,8132	2,15	0,9684
0,61	0,4581	1,33	0,8163	2,20	0,9722
0,62	0,4647	1,34	0,8198	2,25	0,9756
0,63	0,4713	1,35	0,8230	2,30	0,9786
0,64	0,4778	1,36	0,8262	2,35	0,9812
0,65	0,4843	1,37	0,8293	2,40	0,9836
0,66	0,4907	1,38	0,8324	2,45	0,9857
0,67	0,4971	1,39	0,8355	2,50	0,9876
0,68	0,5035	1,40	0,8385	2,55	0,9892
0,69	0,5098	1,41	0,8415	2,60	0,9907
0,70	0,5161	1,42	0,8444	2,65	0,9920

8. Для каждой фракции определяем фракционные коэффициенты очистки

$$\eta_{\text{фр}} = 50[1 + \Phi(x)]. \quad (239)$$

Результаты расчета рекомендуется заносить в таблицу, выполненную по следующей форме:

Результаты расчетов циклонов

$d_i$	X	Φ(x)	$\eta_{\text{фр}}$ , %
-------	---	------	------------------------

9. Для нахождения общего коэффициента очистки находим  $X'$ :

$$X' = \frac{\lg \left( \frac{d_{50}}{d_{50\text{ц}} K 10^3 \sqrt{\frac{D\mu}{\rho_n \omega_{\text{ц}}}}} \right)}{\sqrt{\delta_{\text{ц}} + (\lg \delta_n)^2}}, \quad (240)$$

где  $d_{50}$  – медиана распределения улавливаемой пыли (см. табл. 35):

$\delta_n$  – показатель полидисперсности улавливаемой пыли (см. табл. 35).

Общий коэффициент очистки циклона вычисляем по формуле

$$\eta = 50[1 + \Phi(x)], \quad (241)$$

где  $\Phi(x)$  – см. в табл. 39.

10. По табл. 38 для выбранного типа циклона находим коэффициент гидравлического сопротивления, с помощью которого определяем сопротивление циклона (требуется при выборе вентилятора), Па

$$P_{\text{ц}} = \frac{\xi_{\text{ц}} \rho_1 \omega_{\text{ц}}^2}{2}, \quad (242)$$

где  $\xi_{\text{ц}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления (см. табл. 38);

$\rho_1$  – плотность очищенной среды (можно принять плотность по воздуху), кг/м<sup>3</sup>.

### ***2.7.3. Пример подбора циклона для системы вентиляции участка механического цеха***

Исходные данные:

В заточном участке имеется шесть заточных станков, оборудованных местными отсосами производительностью 900 м<sup>3</sup>/ч каждый. Необходимо подобрать циклон для системы вентиляции.

Расчет:

1. Общее количество удаляемого воздуха

$$L_{\Sigma} = nL_i = 6 \cdot 900 = 2400 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (243)$$

2. Циклон предназначен для очистки сухой пыли из вентиляционной установки, поэтому принимается к установке цилиндрический циклон типа ЦН-15 (расчетные параметры см. в табл. 38).

3. Определяем диаметр циклона

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 5400}{3600 \cdot 3,14 \cdot 3,5}} = 0,739, \text{ м}. \quad (244)$$

4. Ближайший стандартный диаметр равен 700 мм.

5. Для выбранного диаметра циклона фактическая скорость движения воздуха равна

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{4 \cdot 5400}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,7^2} = 3,9 \text{ м/с}. \quad (245)$$

6. Фракционные коэффициенты очистки определяем для следующих фракций: 0 – 5, 5 – 10, 10 – 20, 20 – 40, 40 – 60, 60 – 100; т. е.  $\delta = 5, 10, 15, 20, 40, 60, 100$ .

7. Для первой фракции величина  $X$  равна

$$X = \frac{\lg \left( \frac{5}{3,06 \cdot 41,4 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{0,7 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}}{3600 \cdot 3,9}}} \right)}{0,3979} = 0,297. \quad (246)$$

8. Этой величине соответствует функция логарифмически-вероятностного распределения  $\Phi(x) = 0,2356$  (см. табл. 39).

9. Коэффициент очистки для данной фракции определяем по формуле

$$\eta_{\text{фр}} = 50[1 + \Phi(x)] = 50[1 + 0,2356] = 61,78. \quad (247)$$

10. Результаты расчета фракционных коэффициентов для других фракций приведены в табл. 40.

Таблица 40. Результаты расчета фракционных коэффициентов очистки циклонов типа ЦН-15

$d'$ , мкм	$X$		$\Phi(x)$		$\eta_{\text{фр}}$	
	700	800	700	800	700	800
5	0,2997	0,2219	0,2356	0,1747	61,78	58,45
10	1,0560	0,9780	0,7800	0,6700	89,00	83,50
20	1,8126	1,7350	0,9300	0,9172	96,50	95,86
40	2,5691	2,4916	0,9892	0,9876	99,46	99,38
60	3,0117	2,9341	0,9990	0,9990	99,95	99,95
100	3,5693	3,4912	1,000	1,000	100	100

11. Для определения общего коэффициента очистки находим величину  $X'$  ( $\Phi = 700$  мм)

$$X' = \frac{\lg \left( \frac{21}{3,06 \cdot 41,4 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{0,7 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}}{3600 \cdot 3,9}}} \right)}{\sqrt{0,158 + (\lg 3,7)^2}} = 1,0594,$$

отсюда  $\Phi(x') = 0,7109$ .

12. Общий коэффициент очистки

$$\eta_{\text{фр}} = 50[1 + \Phi(x')] = 50[1 + 0,7109] = 85,55 \%$$

13. Аналогичный расчет выполняем для циклона диаметром 800 мм (см. табл. 40)

$$X' = 1,015; \Phi(x') = 0,692; \eta = 84,6 \%$$

14. Анализируя результаты расчета, окончательно принимаем к установке циклон типа ЦН-15 диаметром 700 мм.

15. Для выбранного циклона определяем гидравлическое сопротивление

$$P_{\text{ц}} = \frac{\xi \omega_{\text{ц}}^2 \rho_i}{2} = \frac{160 \cdot 3,9^2 \cdot 1,2}{2} = 1527 \text{ Па.}$$

Эта величина используется при определении потерь напора в вентиляционной сети и подборе вентилятора.

### Контрольные вопросы

1. Какой бывает вентиляция по способу подачи свежего воздуха в помещение и удаления из него загрязненного?
2. Что такое аэрация и с помощью чего она осуществляется?
3. Что вы можете рассказать о канальной аэрации?
4. Что такое бесканальная аэрация?
5. Что такое аэрационный фонарь?
6. За счет каких факторов осуществляется естественный воздухообмен в помещении?
7. Что такое тепловое давление и как оно определяется?
8. Нужно ли при расчете аэрации помещения учитывать совместное действие теплового и ветрового давлений?
9. Что такое фиктивное ветровое давление?
10. Что такое механическая вентиляция?
11. Какие виды механической вентиляции существуют?
12. Какие бывают варианты расчета сети воздуховодов?
13. К чему сводится расчет сети воздуховодов?
14. Перечислите этапы расчета системы местной вытяжной механической вентиляции.
15. Что такое воздушные завесы и для чего они нужны?
16. Какие бывают виды воздушно-тепловых завес?
17. Что такое завесы шибберного типа?
18. Что такое завесы смешивающего типа?
19. В каких случаях необходимо предусматривать воздушные и воздушно-тепловые завесы?
20. Назовите порядок расчета воздушного душирования.
21. Каков порядок расчета систем аспирации?

### Глава 3. ЗАЩИТА ОТ ВИБРАЦИИ

Широкое распространение вибрационной техники в различных отраслях народного хозяйства ставит задачу предупреждения вредного воздействия вибрации на организм работающих.

Причинами вибраций могут быть использование обратнопоступательных движений в рабочих циклах механизированного инструмента ударного действия, удары и трение рабочих органов станков по обрабатываемым деталям, неточность центровки и неуравновешенность вращающихся масс в машинах и инструментах вращательного действия, вихреобразование и пульсация давления отработанного воздуха на выходе из пневматических инструментов, колебания роторов и статоров под воздействием магнитных полей в электрических машинах, микроудары, поверхностное трение в местах скольжения и в сочленениях движущихся деталей машин, инструментов.

По способу передачи вибрация подразделяется:

- на общую, передающуюся через опорные поверхности на тело сидящего или стоящего человека;
- локальную, передающуюся через руки человека.

При воздействии общей вибрации на организм человека наблюдается нарушение функции центральной нервной системы: приступы головокружения и стойкая головная боль, тремор пальцев рук, выраженная общая слабость. Кроме того, в первый период заболевания возможно нарушение чувствительности в стопах и голени, спазм капилляров пальцев стоп, цианоз, боли в ногах или икроножных мышцах, быстро развивающаяся усталость во время ходьбы. Больные жалуются на быструю утомляемость, шум и чувство тяжести в голове.

Под воздействием вибрации, передающейся на руки рабочего (местная или локальная вибрация), может возникнуть профессиональное заболевание – вибрационная болезнь I, II, III стадии (начальная форма, средней тяжести, тяжелая форма болезни). Признаками виброболезни являются потеря вибрационной, болевой, тактильной и термической чувствительности; изменение тонуса капилляров кожи; секреторные нарушения (усиленная потливость кожи ладоней); нарушение трофики (деформирование пальцев кистей рук – «барабанные палочки»); изменение костно-суставного аппарата.

Требования к гигиеническому нормированию вибрации на производстве представлены в литературе [21]. Нормируемыми параметрами являются среднеквадратичные значения виброскорости (м/с) и виброускорения (м/с<sup>2</sup>) или их логарифмические уровни (дБ) в октавных полосах частот в зависимости от вида вибрации и направления воздействия.

Методы защиты работающего от вибрации подразделяются на коллективные и индивидуальные [22]. К коллективным методам защиты относятся уменьшение вибрации в источнике ее возникновения, вибрация, вибропоглощение, виброгашение. К индивидуальным – применение виброрукавиц, виброперчаток и т. д.

Наиболее радикальным считается первый метод, который заключается в правильном выборе кинематических и технологических схем при конструировании машины и проектировании процессов. Предпочтение отдается таким схемам, в которых динамические процессы, вызванные ударами, резкими ускорениями и тому подобное были бы исключены или предельно снижены.

**Виброизоляция** заключается в уменьшении передачи колебаний от источника возбуждения к защищаемому объекту.

**Вибропоглощение** (демпфирование) – это способ уменьшения вибрации вследствие увеличения потерь энергии в системе.

**Виброгашение** представляет собой соединение источника возбуждения с дополнительной массой упругой связью или без нее.

В данном пособии рассматривается один из весьма распространенных методов борьбы с вибрацией – виброизоляция. Виброизоляция применяется либо для уменьшения динамических воздействий, передаваемых машиной на поддерживающие конструкции, либо для достижения снижения уровня вибраций приборов и прецизионных машин – вибраций, вызываемых колебаниями поддерживающих конструкций или основания. Виброизоляция снижает уровень колебаний рабочих мест и, следовательно, устраняет вредное влияние вибраций на человека.

Возможны два варианта исполнения виброизоляции: заводской, когда машину (станок, прибор и т. п.) выпускают в комплекте с виброизоляционными устройствами, и строительно-монтажный, при котором виброизоляцию осуществляет строительная организация по проекту, выполненному в процессе строительного проектирования. Если

динамический расчет здания на воздействие виброизолированной машины показывает, что заводской вариант виброизоляции не удовлетворяет требованиям надлежащего снижения динамических усилий, передаваемых на конструкции, то производится перерасчет виброизоляции.

Для строительно-монтажного варианта всегда необходим расчет виброизоляции. Применение виброизоляции без предварительного расчета недопустимо, так как ее эффективность может быть существенно снижена.

В данном пособии рассматриваются примеры расчета колебательной системы только с одной степенью свободы по вертикальной оси координат с исключением крутильных колебаний.

### 3.1. Расчет виброизоляции

Для ослабления передачи вибрации от источника к основанию широкое применение нашли виброизоляторы в виде стальных пружин, листовых рессор или упругих материалов: резины, пробки, асбеста. Для этой же цели применяются гидравлические, пневматические и комбинированные виброизоляторы, виброплощадки на воздушных подушках, различные гибкие вставки, гибкие прокладки и т. д. Стальные пружинные виброизоляторы могут быть использованы на любых частотах, резиновые – выше 12 Гц, металлорезиновые – с 6 Гц, пробковые – свыше 20 Гц.

Эффективность виброизоляции определяется коэффициентом передачи (КП), который, если пренебречь трением, может быть рассчитан по формуле

$$\text{КП} = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1}, \quad (248)$$

где  $f$  – частота вынуждающей силы, Гц;

$f_0$  – частота собственных колебаний системы, Гц.

Из формулы видно, что чем ниже собственная частота по сравнению с частотой вынуждающей силы, тем выше эффективность виброизоляции. При  $f < f_0$  вынуждающая сила действует как статическая и целиком передается основанию. При  $f = f_0$  наступает резонанс, сопровождающийся резким возрастанием уровня вибраций. В этом случае трение в системе уменьшает колебания. Так как пружинные виброизо-

ляторы обладают малым затуханием, их часто совмещают с резиновыми прокладками и вкладышами. При  $f \geq \sqrt{2f} < f_0$  режим резонанса не осуществляется, значение КП равно единице, а при дальнейшем увеличении частоты он становится меньше единицы, передача вибрации уменьшается.

Таким образом, установка виброизоляторов дает тем больший эффект, чем больше частоты  $f$  и  $f_0$  отличаются друг от друга. Для получения положительного результата должно выполняться условие

$$\frac{f}{f_0} \geq \sqrt{2}. \quad (249)$$

Для получения значительного эффекта должно быть выдержано соотношение

$$\frac{f}{f_0} = 3 \dots 4. \quad (250)$$

Например, для ослабления общих вибраций в зоне обслуживания мощных дизелей в 100 раз (КП = 0,01) собственная частота колебаний компрессора, установленного на виброизоляторы, должна быть в 10 раз меньше частоты возбуждающей силы. Если частота вращения коленчатого вала ротора дизеля  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ , то частота его собственных колебаний должна быть  $f_0 = f/10 = n/(60 \cdot 10) = 0,5 \text{ Гц}$ .

Эффективность виброизоляции оценивается в процентах. При отношениях частот  $f/f_0 = 2,5$  эффективность виброизоляции составляет 81 %, а при  $f/f_0 = 3, 4, 5$  она будет равна соответственно 87,5 %, 93 %, 96 %.

Методика расчета виброизоляции сводится к определению частоты вынуждающей силы, возникающей при работе машины или агрегата, частоты собственных колебаний системы, статической осадки виброизоляторов, коэффициента жесткости виброизоляторов.

Для поршневых машин частота вынуждающей силы определяется, Гц,

$$f_B = \frac{nmK}{60}, \quad (251)$$

где  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$m$  – число цилиндров;

$K$  – тактность двигателя (для четырехтактного  $K = 2$ ).

Для других машин, Гц,

$$f_{\text{в}} = \frac{Zn}{60}, \quad (252)$$

где  $Z$  – количество дебалансов (у виброплощади – дебалансы, у вентилятора – лопасти);

$n$  – частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ .

Под влиянием веса машины, установленной на основание с большой массой, виброизоляторы получают статическую осадку  $X_{\text{ст}}$ , которая считается основным расчетным параметром. Статическая осадка виброизоляторов определяется из выражения

$$X_{\text{ст}} = \frac{Q}{K_{\text{ж}}k}, \quad (253)$$

где  $Q$  – сила веса машины, Н;

$K_{\text{ж}}$  – коэффициент упругости или жесткости виброизолятора, Н/м;

$k$  – количество виброизоляторов.

Статическая осадка связана с собственной частотой свободных колебаний следующей зависимостью, м,

$$f_0 = \frac{0,5}{\sqrt{X_{\text{ст}}}}, \quad (254)$$

откуда

$$X_{\text{ст}} = \frac{0,25}{f_0^2} \text{ м.} \quad (255)$$

Формула (254) является основной при расчете виброизоляторов. Из формулы (253) следует, что коэффициент жесткости виброизоляторов равен, Н/м,

$$K_{\text{ж}} = \frac{Q}{X_{\text{ст}}k}. \quad (256)$$

Чем больше статическая осадка, тем ниже собственная частота и тем эффективнее виброизоляция. Чем выше частота вибрации, тем легче осуществить виброизоляцию. Отсюда следует, что существует оптимальное соотношение между частотой возбуждения и собственной частотой колебания системы. Оно составляет  $f/f_0 = 3 \dots 4$ , что соответствует  $\text{КП} = 1/8 \dots 1/5$ .

### 3.2. Расчет пружинных виброизоляторов

Эффективное ослабление вибраций низкой частоты (ниже 15 Гц) в большинстве случаев возможно лишь с помощью виброизоляторов из стальных пружин. Пружины просты, стабильны, дешевы, долговечны, малогабаритны и хорошо противостоят действию высокой температуры, при антикоррозийных покрытиях они не боятся сырости.

Последовательность расчета пружинных виброизоляторов:

1. Принимают или находят коэффициент передачи динамической нагрузки на основание.
2. Определяют частоту собственных колебаний системы на виброизоляторах.
3. Определяют жесткость всех виброизоляторов в вертикальном направлении.
4. Принимают число виброизоляторов.
5. Находят жесткость одного виброизолятора.
6. Определяют статистическую и динамическую нагрузку на один виброизолятор.
7. Вычисляют амплитуду вынужденных вертикальных колебаний виброизолированной установки.
8. Находят диаметр прутка пружины виброизолятора.
9. Определяют диаметр пружины.
10. Находят число рабочих витков.
11. Устанавливают число нерабочих витков.
12. Определяют шаг пружины.
13. Находят высоту ненагруженной пружины.
14. Определяют статистическую величину осадки виброизолятора.
15. Проводят уточненный расчет виброизоляции и определяют ее эффективность.

Параметры типовых опорных пружин приведены в табл. 41 – 43.

При расчете пружинных виброизоляторов следует учитывать статистические и динамические нагрузки по формуле, Н,

$$P = P_{ст} + 1,5P_{дин}, \quad (257)$$

где  $P$  – расчетная нагрузка на одну пружину;

$P_{ст}$  – статистическая нагрузка на одну пружину;

1,5 – коэффициент, учитывающий усталостные явления материала пружины;

$P_{дин}$  – динамическая нагрузка на одну пружину.

Определяем динамическую и расчетную нагрузку на пружину, Н,

$$P_{\text{дин}} = \alpha K_{\text{ж}}, \quad (258)$$

где  $P_{\text{дин}}$  – динамическая нагрузка на одну пружину;

$\alpha$  – амплитуда колебаний агрегата при рабочем режиме, м;

$K_{\text{ж}}$  – жесткость одной пружины.

Амплитуду колебаний агрегата определяем по формуле, м,

$$\alpha = \frac{P_{\text{ст}}}{m\omega_{\text{в}}^2}, \quad (259)$$

где  $P_{\text{ст}}$  – статическая нагрузка на пружину, Н;

$m$  – масса источника колебаний, кг;

$\omega_{\text{в}}$  – круговая частота вынужденных колебаний, определяется по формуле

$$\omega_{\text{в}} = \frac{2\pi f_{\text{в}}}{60}, \quad (260)$$

где  $f_{\text{в}}$  – частота вынужденных колебаний, Гц.

Выбираем пружину с определенным индексом (отношение диаметра пружины к диаметру проволоки), мм,

$$C = \frac{D}{d}. \quad (261)$$

Чем больше  $C$ , тем больше податливость пружины при одном и том же числе витков. Значение  $C$  рекомендуется принимать от 4 до 10 [32].

В зависимости от индекса пружины  $C$  находим коэффициент  $K_c$ , учитывающий повышение напряжения в точках сечения прутка, лежащего на поверхности цилиндра диаметром  $D_1 = D - d$  (поправочный коэффициент, учитывающий кривизну витков).

Таблица 41. Значения параметров  $C$  и  $K_c$

$C$	3	4	5	6	7	8	10	11	12
$K_c$	1,5	1,37	1,3	1,24	1,2	1,17	1,14	1,15	1,11

Определяем диаметр прутка пружины  $d$  и количество витков пружины, мм,

$$d = 1,6 \frac{\sqrt{K_c P_{\text{расч}} C}}{[\tau]_к}, \quad (262)$$

где  $[\tau]_к$  – допустимое напряжение кручения материала пружины, Па, приведено в табл. 42.

Таблица 42. Допускаемое напряжение кручения материала пружины

Сталь		Модуль сдвига $G$ , Па	Допускаемое напряжение кручения		Назначение
Группа	Марка		Режим работы	$[\tau]_к$ , Па	
Углеродистая	65 70	$8 \cdot 10^{10}$	Легкий	$420 \cdot 10^6$	Для пружин с относительно низкими напряжениями при диаметре проволоки $< 8$ мм
			Средний	$350 \cdot 10^6$	
			Тяжелый	$280 \cdot 10^6$	
Хромованадиевая, закаленная в масле	50 ХФА	$7,84 \cdot 10^{10}$	Легкий	$560 \cdot 10^6$	Для пружин, воспринимающих динамическую нагрузку при диаметре прутка менее 12,5 мм
			Средний	$500 \cdot 10^6$	
			Тяжелый	$400 \cdot 10^6$	
Кремнистая	55С2 60С2 60С2А 63С2А	$7,6 \cdot 10^{10}$	Легкий	$560 \cdot 10^6$	Для пружин, воспринимающих динамическую нагрузку при диаметре прутка более 10 мм, а также для рессор
			Средний	$450 \cdot 10^6$	
			Тяжелый	$350 \cdot 10^6$	

Из формулы (261) находим наружный диаметр пружины, мм.

$$D = Cd. \quad (263)$$

Определяем число рабочих витков пружины (некоторые витки, прилегающие к торцам, не участвуют в работе)

$$i = \frac{Gd}{8K_{ж}C^3}, \quad (264)$$

где  $G$  – модуль упругости при сдвиге, Па (см. табл. 42).

Определяем общее количество витков пружины

$$i = i_1 + i_2, \quad (265)$$

где  $i_2$  – число нерабочих витков пружины, которое изменяется:

при  $i_1 > 7, i_2 = 2,5$ ,

при  $i_1 < 7, i_2 = 1,5$ .

Рассчитываем коэффициент жесткости пружины, Н/м.

$$K_{ж} = \frac{Gd}{8C^3i}, \quad (266)$$

Вычисляем статическую осадку пружины, м.

$$X_{ст} = \frac{P_{ст}}{K_{ж}}. \quad (267)$$

Находим собственную частоту колебаний по формуле (254), Гц.

$$f_0 = \frac{0,5}{\sqrt{X_{ст}}}. \quad (268)$$

Определяем коэффициент передачи (КП) по формуле (248).

$$КП = \frac{1}{\left(\frac{f_{в}}{f_0}\right)^2 - 1}, \quad (269)$$

и эффективность виброизоляции по формуле

$$\varepsilon = (1 - КП)100 \%. \quad (270)$$

### ***Пример расчета пружинных виброизоляторов***

Рассчитать виброизоляцию двигателя внутреннего сгорания при испытании на стенде. Масса двигателя – 200 кг, максимальное число оборотов – 4500 мин<sup>-1</sup>; масса асинхронного электродвигателя с плитой – 400 кг; максимальное число оборотов – 4000 мин<sup>-1</sup>.

Вид стенда с двигателем приведен на рис. 40.

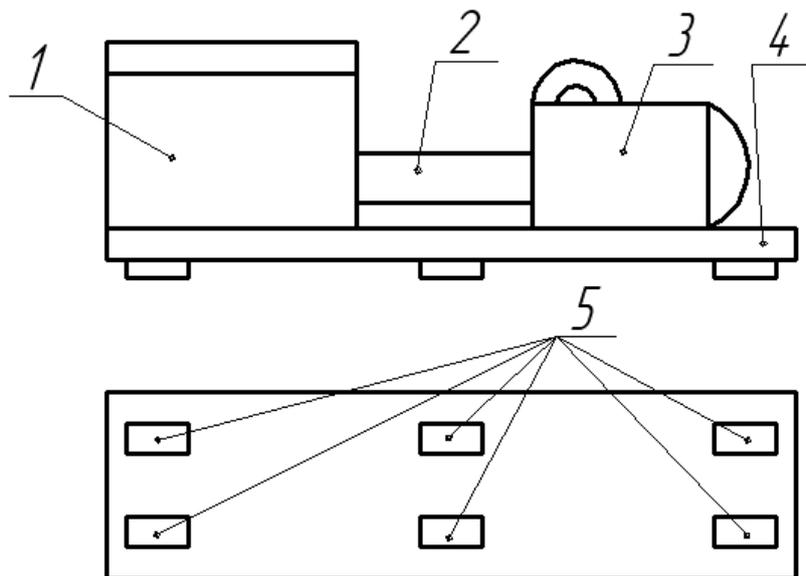


Рис. 40. Вид стенда с двигателем: 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – карданный вал; 3 – асинхронный трехфазный электродвигатель; 4 – плита; 5 – комбинированные виброизоляторы

Процесс испытания двигателя состоит из трех этапов: холодной приработки двигателя путем вращения его электродвигателем, приработки двигателя на холостом ходу, приработки двигателя под нагрузкой и приемки.

Режимы приработки двигателя приведены в табл. 43.

Таблица 43. Режимы приработки двигателя

Стадия приработки	Частота вращений, мин <sup>-1</sup>	Продолжительность, мин
Холодная приработка	400 – 600	35
Горячая приработка на холостом ходу	1000 – 1500	85
Приработка двигателя под нагрузкой и приемка его при работе на полной нагрузке с максимальной частотой вращения	4000	120

Устройства, к которым относится данный вид двигателя, имеют широкий диапазон частот вынужденных колебаний. Для виброизоляции целесообразно применять комбинированные резинометаллические виброизоляторы, способные эффективно снизить колебания в широком диапазоне частот.

### Решение

1. Частота вынужденных колебаний (поскольку максимальная амплитуда колебаний стенда при частоте вращения двигателя  $n = 400 \text{ мин}^{-1}$ )

$$f_{\text{в}} = \frac{nmk}{60} = \frac{400 \cdot 4,2}{60} = 53,33 \text{ Гц.}$$

2. Частота собственных колебаний установки принимается в три раза меньше вынужденных, т. е.

$$f_0 = \frac{53,33}{3} = 17,77 \text{ Гц.}$$

3. Требуемая статическая осадка установки

$$X_{\text{ст}} = \frac{0,25}{f_0^2} = \frac{0,25}{17,77^2} = 0,0008 \text{ м.}$$

4. Суммарный коэффициент жесткости пружинных и резиновых виброизоляторов

$$K_{\text{ж}} = \frac{Q}{X_{\text{ст}}K} = \frac{6000}{0,0008 \cdot 12} = 62,5 \cdot 10^4, \text{ Н/м.}$$

Учитывая, что вес установки распределяется поровну между пружинными и резиновыми виброизоляторами, то и их жесткость должна быть разделена поровну

$$K_{\text{жпр}} = K_{\text{жр}} = \frac{K_{\text{ж}}}{2} = \frac{62,5 \cdot 10^4}{2} = 31,25 \cdot 10^4 \text{ Н/м.}$$

5. Жесткость одной пружины (из условий компоновки стенда число пружин  $n = 6$ )

$$K'_{\text{жпр}} = \frac{K_{\text{жпр}}}{6} = \frac{31,25 \cdot 10^4}{6} = 52 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

6. Динамическая и расчетная нагрузка на одну пружину

$$P'_{\text{дин}} = \alpha_{\text{оз}} K'_{\text{жпр}} = 0,315 \cdot 52 \cdot 10^3 = 16,4 \cdot 10^3 \text{ Н,}$$

$$\text{где } \alpha_{\text{оз}} = \frac{P'_{\text{ст}}}{m\omega_{\text{в}}^2} = \frac{mg}{m\omega_{\text{в}}^2} = \frac{9,81}{5,58^2} = 0,315 \text{ рад/с,}$$

$$\text{где } \omega_{\text{в}} = \frac{2\pi f_{\text{в}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 53,3}{60} = 5,58 \text{ рад/с.}$$

7. Индекс пружины  $C = \frac{D}{d} = 7$ .

8. Диаметр прутка пружины

$$d = 1,6 \sqrt{\frac{K_{\text{с}} P'_{\text{расч}} C}{[\tau]}} = 1,6 \sqrt{\frac{25,6 \cdot 10^3 \cdot 7}{420 \cdot 10^6}} = 0,036 \text{ м.}$$

9. Наружный диаметр пружины  $D = cd = 7 \cdot 0,036 = 0,253 \text{ м.}$

10. Число витков пружины  $i_1 = \frac{Gd}{8K'_{\text{ж}} C^3} = \frac{7,84 \cdot 10^{10} \cdot 0,036}{8 \cdot 52 \cdot 10^3 \cdot 7^3} = 19,7$ .

11. Полное число витков пружины  $i_n = i_1 + i_2 = 19,7 + 2,5 = 22,2$ .

12. Фактический коэффициент жесткости всех пружинных виброизоляторов  $K_{\text{жпр}} = \frac{Gd}{8i_{\text{пр}} C^3} n_{\text{пр}} = \frac{7,84 \cdot 10^{10} \cdot 0,036}{8 \cdot 22,2 \cdot 7^3} 6 = 278 \text{ Н/м.}$

13. Фактическая статическая осадка всех пружин виброизоляторов

$$X_{\text{ст}} = \frac{P'_{\text{ст}}}{K_{\text{жпр}}} = \frac{6000}{31,25 \cdot 10^4} = 0,02 \text{ м.}$$

14. Фактическая собственная частота колебаний

$$f_0 = \frac{0,5}{\sqrt{X_{\text{ст}}}} = \frac{0,5}{\sqrt{0,02}} = 3,5 \text{ Гц.}$$

15. Коэффициент вибропередачи:

$$M_{\text{пр}} = \frac{1}{\left(\frac{f_{\text{в}}}{f_0}\right)^2 - 1} = \frac{1}{\left(\frac{53,3}{3,5}\right)^2 - 1} = 0,004.$$

16. Эффективность виброизоляции

$$\varepsilon = (1 - \mu) 100 \% = (1 - 0,004) 100 \% = 99,6 \ %.$$

Аналогичным образом рассчитывается эффективность виброизоляции при других частотах и данные заносятся в таблицу.

Расчет резиновых виброизоляторов приводится на  $f_b = 4000 \text{ мин}^{-1}$  для резины специальных сортов ( $\delta = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ).

17. Площадь поперечного сечения всех резиновых элементов

$$F = \frac{Q_p}{\sigma} = \frac{6000}{0,3 \cdot 10^6} = 0,02 \text{ м}^2.$$

18. Площадь одного резинового элемента

$$F'_p = \frac{F}{n_p} = \frac{0,02}{6} = 0,0033 \text{ м}^2.$$

19. Рабочая высота резинового элемента

$$H_p = \frac{E_g F'_p}{K_{ж}^p} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 33 \cdot 10^{-3}}{31,25 \cdot 10^4} = 0,106 \text{ м}.$$

20. Полная высота резинового элемента

$$H = 1,5H_p = 1,5 \cdot 0,106 = 0,16 \text{ м}.$$

21. Форму резиновых элементов принимаем цилиндрической с отверстием для крепления  $\varnothing 10 \text{ мм}$  (рис. 41).

$$F'_p = \pi R^2 - \pi r^2 = \pi(R^2 - r^2),$$

$$r = \sqrt{R^2 - \frac{F'_p}{\pi}}, R = \sqrt{\frac{F'_p}{\pi} + r^2}.$$

$$\text{Тогда } R = \sqrt{\frac{F'_p}{\pi} + r^2} = \sqrt{\frac{0,0033}{3,14} + 0,005^2} = 0,032 \text{ м}.$$

$H > 0,45R$ , т. е. условие выполняется.

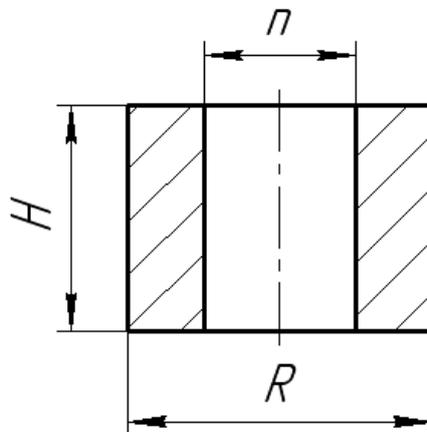


Рис. 41. Форма резиновых элементов

22. Фактическая статическая осадка резиновых элементов

$$X_{\text{стр}}^{\phi} = \frac{Q_p H}{E_g m F_1} = \frac{600 \cdot 9,81 \cdot 0,16}{10 \cdot 10^{10} \cdot 600 \cdot 0,0033} = 4,75 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

23. Фактическая собственная частота резиновых виброизоляторов  $f_{\text{ор}}^{\phi} = \frac{0,5}{\sqrt{X_{\text{стр}}^{\phi}}} = \frac{0,5}{0,0689} = 7,25 \text{ Гц.}$

24. Коэффициент вибропередачи для резиновых элементов

$$\mu_p = \frac{1}{\left(\frac{f_B}{f_0}\right)^2 - 1} = \frac{1}{\left(\frac{53,33}{7,25}\right)^2 - 1} = 0,019.$$

25. Эффективность виброизоляции с применением резиновых виброизоляторов  $\mathcal{E} = (1 - \mu)100 \% = (1 - 0,019)100 \% = 98,1 \%$ .

Аналогичным образом, повторяя пп. 15, 16, 24, 25 для разных  $f_B$ , проводится расчет виброизоляции на всех оборотах двигателя и данные заносятся в табл. 44.

Таблица 44. Результаты расчетов

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Эффективность виброизоляции, %		
	Виброизоляторы		
	Резиновые	Пружинные	Комбинированные
400	84	99,6	91,8
600	88	92	90
1000	89,6	91,8	90,7
1500	94,5	90	92,25
4000	98,1	88	93,05

По данным таблицы составляется график зависимости эффективности виброизоляции от частоты вращения вала двигателя (рис. 42).

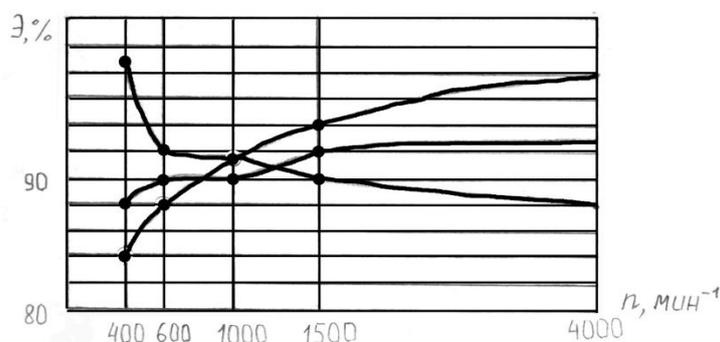


Рис. 42. График зависимости эффективности виброизоляции от частоты вращения вала двигателя

Таким образом, эффективность комбинированных виброизоляторов при низких частотах выше, чем резиновых, а на высоких частотах выше, чем пружинных. Это позволяет применять их на установках с большим диапазоном частот.

### 3.3. Расчет резиновых виброизоляторов

Резиновые (упругие) виброизоляторы (прокладки) хорошо задерживают распространение вибрации сравнительно высокой частоты, возникающие при большом числе оборотов машины (2000 об/мин и более). На резиновых прокладках можно монтировать машины значительных мощностей, соответственно подобрав количество опорных точек, качество и величину прокладок. Недостатком резиновых виброизоляторов является их недолговечность. Резиновые виброизоляторы со временем становятся жестче и через 5 – 7 лет их необходимо заменять. Кроме того, с их помощью нельзя получить очень низкие собственные частоты колебаний системы, которые необходимы для тихоходных агрегатов из-за неизбежной в этом случае перегрузки прокладок, значительно сокращающей срок их службы.

При использовании резиновых виброизоляторов (прокладок) следует предусматривать меры для обеспечения деформации в горизонтальной плоскости. Для этого резиновые виброизоляторы должны иметь форму ребристых или дырчатых плит (рис. 43).

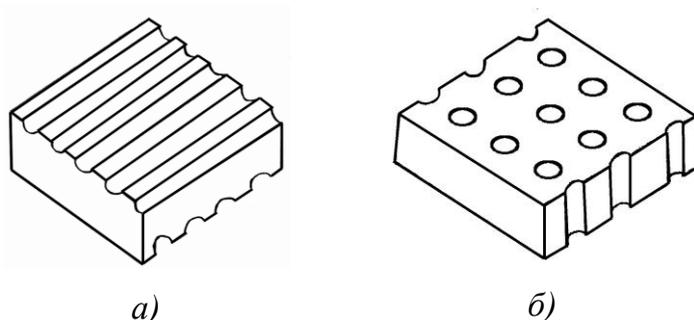


Рис. 43. Форма резиновых виброизоляторов:  
а – ребристый; б – дырчатый

Расчет резиновых виброизоляторов сводится к определению их площади, рабочей высоты и эффективности виброизоляции. Исходя из конструктивных особенностей машины задаются числом виброизоляторов. Практически в большинстве случаев число виброизоляторов

определяется количеством точек крепления, а площадь виброизоляторов – площадью основания и при расчете приходится варьировать материалом и толщиной.

Площадь резиновых элементов исходя из условия прочности резины определяют по формуле

$$F = \frac{Q}{[\delta]}, \quad (271)$$

где  $Q$  – нагрузка, приходящаяся на все резиновые виброизоляторы  $H$ ;

$[\delta]$  – допустимое напряжение для материала резинового виброизолятора (для мягкой резины рекомендуется принимать равным  $0,8 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, для твердой –  $4 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>).

Определяем площадь одного резинового элемента

$$F'_p = \frac{F'}{n_p}, \quad (272)$$

где  $n_p$  – число резиновых элементов.

Рассчитываем рабочую высоту резиновых виброизоляторов, м,

$$H_p = \frac{E_g F}{K_{ж}}, \quad (273)$$

где  $E_g$  – динамический модуль упругости, Н/м<sup>2</sup> (табл. 45);

$K_{ж}$  – коэффициент жесткости резины, Н/м.

Таблица 45. Характеристика резиновых материалов

Вид резины	Допустимое напряжение $\sigma$ , Н/м <sup>2</sup>	Динамический модуль упругости $E_g$ , Н/м <sup>2</sup>	$\frac{E_g}{\sigma}$
Губчатая	$0,03 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	100
Мягкая	$0,08 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	63
В виде ребристых плит или плит с отверстиями	$(0,08...1)10^6$	$4 \cdot 10^6$	50
Специальных сортов	$(0,3...0,4)10^6$	$10 \cdot 10^6$	25
ИРП 1346	$(0,2...0,3)10^6$	$3,9 \cdot 10^6$	20

Высота квадратного резинового виброизолятора должна быть не менее четверти его ширины

$$H = \frac{A}{4}. \quad (274)$$

Определяем статическую осадку виброизолятора

$$X_{\text{ст}} = \frac{QH}{E_g mF}. \quad (275)$$

Находим собственную частоту колебаний по формуле (254).

Определяем коэффициент передачи по формуле (249) и эффективность виброизоляции по формуле (270).

Если при расчете процент эффективности получился 81, то в расчете резиновых виброизоляторов проводятся следующие изменения:

- а) выбирают тип резины с меньшим динамическим модулем упругости;
- б) увеличивают вес машины путем присоединения к ней дополнительной массы;
- в) переходят на другие виды виброизоляторов, например стальные или комбинированные.

### Контрольные вопросы

1. Что такое вибрация?
2. В чем негативное воздействие вибрации на организм человека?
3. Назовите причины возникновения вибраций.
4. Как подразделяется вибрация по способу передачи?
5. Назовите виды вибрации.
6. Какие симптомы наблюдаются у человека при воздействии общей вибрации?
7. Что такое вибрационная болезнь?
8. Каким нормативным документом регламентируется гигиеническое нормирование вибрации?
9. Какие существуют методы защиты человека от вибрации?
10. Раскройте понятие «виброизоляция».
11. Дайте определение понятия «виброгашение».
12. Охарактеризуйте понятие «вибропоглощение».
13. Сколько стадий имеет вибрационная болезнь?
14. Как на практике реализуется виброизоляция?
15. Какими способами реализуется вибропоглощение?
16. Какими методами реализуется виброгашение?

## Глава 4. БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 4.1. Общие положения

Основной особенностью применения лазеров в производственных процессах является значительное превышение безопасного уровня энергии (мощности) лазерного излучения. Это требует специальных мер по обеспечению безопасных условий труда, так как персонал, обслуживающий лазерные установки, находится в непосредственной близости от них.

Согласно [23] лазеры по степени опасности генерируемого излучения делятся на четыре класса. Выходное излучение лазерных установок 1-го класса не представляет опасности для глаз и кожи. Выходное излучение лазеров 2-го класса представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением. Выходное излучение лазеров 3-го класса опасно при облучении глаз прямым, зеркально отраженным, а также диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности и при облучении кожи прямым и зеркально отраженным излучением. Лазерные установки 4-го класса представляют опасность при облучении кожи диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности.

Зеркально отраженным лазерным излучением является излучение, отраженное под углом, равным углу падения излучения. Диффузно отраженным лазерным излучением считается излучение, отраженное от поверхности, соизмеримой с длиной волны по всевозможным направлениям в пределах полусферы.

Класс опасности лазера наряду с его техническими характеристиками указывается в паспорте оборудования.

Воздействие лазерного излучения на человека отличается рядом особенностей. Вследствие того что биологические ткани имеют разные спектральные характеристики поглощения, лазерное излучение действует избирательно на различные органы и системы и внутриклеточные структуры (в зависимости от наличия в них пигментных образований, способных поглощать излучение определенной длины волны). Воздействие лазерного излучения может вызвать в биологической

ткани целый ряд эффектов: тепловой, ударный, фотохимический, светового давления, электрострикции, образования на уровне клетки микроволнового электромагнитного поля.

Важнейшим эффектом взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями считается тепловой эффект. Специфика теплового действия лазерного излучения состоит в том, что в сложных структурах тканей могут нагреваться до высоких температур лишь некоторые слои, а при воздействии коротких импульсов – лишь некоторые элементы клеток, в то время как среднее по всей клетке приращение температуры мало. При достаточно высокой плотности мощности излучения выделяющееся в ткани тепло вызывает коагуляцию белков и других органических молекул, что клинически выявляется в виде ожогов тканей. Излучение ряда лазеров имеет высокую удельную мощность, достаточную не только для нагрева, но и для испарения любой биологической ткани.

При высокой мощности излучения или при работе лазера в режиме синхронизации мод (длительность импульса порядка  $10^{-12}$  с) наблюдается ударное действие лазерного излучения. Механизм возникновения ударного эффекта может быть различен: изменение агрегатного состояния тканевой воды, тепловое расширение без изменения агрегатного состояния, явление отдачи при испарении вещества с поверхности облучаемой ткани. В результате этих процессов в ткани возникает резкое повышение давления, которое распространяется сначала со сверхзвуковой скоростью, имея характер ударной волны, затем постепенно замедляется. При лазерном облучении кожи ударная волна, распространяясь во внутренних тканях, может вызвать их повреждение без каких-либо внешних проявлений.

Лазерное излучение также может инициировать в облучаемых тканях фотохимические реакции, являющиеся результатом активации биомолекул при поглощении кванта энергии излучения. Необходимо отметить и возможность образования в тканях свободных радикалов, которые, вступая в реакции с биомолекулами, нарушают нормальные метаболические процессы в клетке. Образование и накопление большого количества свободных радикалов в тканях человека, подвергнутого лазерному облучению, ведет к общему ухудшению состояния его здоровья.

Непосредственным результатом острого интенсивного облучения глаз лазерным излучением УФ-С- и УФ-В-диапазонов является фотокератит, в развитии которого основную роль играет фотохимический механизм, а в основе эффектов лазерного УФ-А-излучения лежат и тепловой, и фотохимический механизмы. Лазерное излучение видимого и ИК-А-диапазонов длин волн вызывает ожоги сетчатки, причем механизм повреждения сетчатки короткими импульсами лазерного излучения отличается от ожогов, развивающихся вследствие воздействия длительных экспозиций, т. е. разные временные параметры лазерного излучения включают различные механизмы биологических изменений в сетчатке. Так, при очень коротких импульсах (например, при действии лазера с модулированной добротностью или в режиме синхронизации мод) повреждение сетчатки выступает следствием возникновения термоакустической ударной волны и локального нагрева гранул меланина до очень высоких температур (в некоторых случаях даже превышающих 100 °С), хотя повышение температуры в самой сетчатке при этом невелико.

Преобладание нетермических способов передачи энергии облучения в ткани при сверхкоротких длительностях импульса дает основание считать подобные биологические эффекты специфически лазерными. При использовании длительного лазерного излучения порядка 1 мкс ожоги сетчатки являются следствием тепловой денатурации белковых и сложных органических молекул ткани. И, наконец, пороговые повреждения сетчатки при длительном (1 – 100 с) воздействии лазерного излучения инициируются фотохимическими реакциями в фоторецепторах и пигментном эпителии. Пороговые мощности (энергии) лазера, вызывающие повреждения сетчатки глаз в 50 % случаев, представлены в табл. 46, приведенной в подразд. 4.3.

Длинноволновое видимое и ИК-А-лазерное излучение вызывает также повреждения тканей передней части глаза. Лазерное излучение ИК-В-диапазона длин волн инициирует изменения в хрусталике и роговичной оболочке. В ИК-С-диапазоне оптические среды глаза становятся непрозрачными, так как поглощение лазерного излучения этой области спектра водой (основной составляющей всех биологических тканей) является слишком высоким. Поэтому воздействие ИК-С-лазерного излучения на орган зрения ограничивается главным образом роговицей. Для длинноволнового ИК-диапазона механизм взаимодействия с биологическими тканями становится чисто тепловым. В ИК-С-области

спектра так же, как и в УФ-А и УФ-В-диапазонах, порог повреждения тканей глаза приближается по величине к порогу повреждения кожи. Пороговые мощности (энергия) лазера, вызывающие развитие кожных реакций в 50 % случаев под действием излучения, представлены в табл. 47 в подразд. 4.3.

В качестве основного нормируемого параметра лазерного излучения в [24] установлена энергетическая экспозиция  $H$  облучаемых тканей. Энергетическая экспозиция – отношение энергии излучения, падающей на рассматриваемый участок поверхности, к площади этого участка или произведение энергетической освещенности на длительность облучения. Предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения относятся к спектральному диапазону от 0,2 до 20 мкм. Кроме того, для длин волн от 0,4 до 1,4 мкм установлены также ПДУ энергетической экспозиции сетчатки глаза  $H_c$ , а специально для видимого диапазона спектра (0,4 – 0,75 мкм), кроме указанных параметров, нормируется также энергия излучения  $Q$  на сетчатке глаза.

Предельно допустимые уровни лазерного излучения исключают появление первичных биологических эффектов (органические изменения) для всего спектрального диапазона и вторичных биологических эффектов (неспецифические изменения в облучаемой ткани) для видимой области спектра.

Предельно допустимые уровни зависят от следующих параметров: длин волн лазерного излучения  $\lambda$ , мкм; длительности импульса  $\tau$ , с; частоты повторения импульсов  $f$ , Гц; длительности воздействия серий импульсов  $t$ , с.

В диапазоне 0,4 – 1,4 мкм ПДУ дополнительно зависят от углового размера источника излучения  $\alpha$ , рад, или от диаметра пятна засветки на сетчатке  $d_c$ , см; диаметра зрачка глаза  $d_{зс}$ , см. В диапазоне длин волн от 0,4 до 0,75 мкм ПДУ зависят от фоновой освещенности роговицы глаза  $E_\phi$ , ЛК =  $\Phi_p$ .

При работе лазера (установки) в импульсно-периодическом режиме при расчетах ПДУ должны учитываться энергетические характеристики максимального импульса серии. При известном времени воздействия  $t$  зависимость энергетической освещенности  $E_e$  от значения энергетической экспозиции определяется по формуле

$$H_e = E_e t. \quad (276)$$

При оценке степени опасности облучения кожи лазерным излучением с длиной волны от 0,2 до 20 мкм энергетическая экспозиция облучаемой поверхности сравнивается с ПДУ.

При оценке степени опасности облучения глаз по первичным биологическим эффектам энергетическая экспозиция на роговице сравнивается с ПДУ облучения для точечного источника (если  $\alpha < 10^{-3}$  рад). Если уровень энергетической экспозиции (освещенности) меньше ПДУ, то облучение считается безопасным независимо от геометрии источника. Если уровень превышает ПДУ, в этом случае должен быть определен угловой размер источника излучения  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = d \cos(\Theta/R), \quad (277)$$

где  $d$  – диаметр источника излучения, см;

$\Theta$  – угол между нормалью к поверхности источника и направлением наблюдения, град;

$R$  – расстояние от источника излучения до точки наблюдения, см.

Уровень излучения сравнивается с ПДУ для данного углового размера источника.

Облучение глаз прямым лазерным излучением приравняется к случаю облучения глаз излучением от точечного источника. При источнике излучения сложной конфигурации за его диаметр принимается наименьший размер. Усреднение энергетической экспозиции допускается по круглому входному зрачку с диаметром не более 0,8 см. Угол поля зрения должен быть больше углового размера источника излучения.

При необходимости пересчет значений энергетической экспозиции роговицы глаза в значение энергии, поглощаемой сетчаткой, проводят по формуле

$$Q = 0,25\pi H_{ep} d_3^2 \tau_{гл}, \quad (278)$$

где  $H_{ep}$  – энергетическая экспозиция роговицы глаза;

$d_3$  – диаметр зрачка глаза;

$\tau_{гл}$  – спектральный коэффициент поглощения излучения сетчаткой.

При воздействии на глаза лазерного излучения с длиной волны от 0,4 до 0,75 мкм оценка степени опасности излучения проводится как по первичным, так и вторичным биологическим эффектам. Оценку степени опасности излучения по вторичным биологическим эффектам проводят путем сравнения значения энергетической экспозиции роговицы глаза с соответствующим ПДУ.

ПДУ моноимпульсного и непрерывного лазерного излучения с длиной волны от 0,2 до 0,4 мкм. Для лазерного излучения с длиной волны от 0,2 до 0,4 мкм нормируется энергетическая экспозиция  $H_{уф}$  на роговице и коже за общее время облучения в течение рабочего дня. Значения  $H$  приведены в табл. 48 подразд. 4.3.

ПДУ моноимпульсного и непрерывного лазерного излучения с длиной волны 0,4 – 1,4 мкм для роговицы глаза. ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от излучения с длиной волны от 0,4 до 0,75 мкм, не вызывающего первичных  $H_{п}$  и вторичных  $H_{в}$  биологических эффектов, определяется по формулам:

$$H_{п} = H_1 K_1, \quad (279)$$

$$H_{в} = 0,1 H_2 E_{ф}, \quad (280)$$

где  $H_1$  – энергетическая экспозиция на роговице глаза, Дж/см<sup>2</sup>, в зависимости от длительности воздействия импульса  $t$  и углового размера источника излучения  $\alpha$  при максимальном диаметре зрачка глаза  $d_3$ , равном 0,8 см (табл. 49 подразд. 4.3);

$K_1$  – поправочный коэффициент на длину волны лазерного излучения  $\lambda$  и диаметр зрачка глаза  $d_3$  (табл. 50 подразд. 4.3).

$H_2$  – суммарная энергетическая экспозиция на роговице глаза за рабочий день в зависимости от диаметра зрачка и длины волны излучения (табл. 51 подразд. 4.3).

Диаметр зрачка глаза  $d_3$  в зависимости от фоновой освещенности роговицы глаза  $E_{ф}$  находится по табл. 52 подразд. 4.3.

В качестве ПДУ выбирается наименьшее из полученных значений  $H_{п}$  и  $H_{в}$ . ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от излучения с длиной волны от 0,75 до 1,4 мкм определяется по формуле (282).

ПДУ моноимпульсного и непрерывного лазерного излучения дальней инфракрасной области спектра. ПДУ энергетической экспозиции от излучения с длиной волны 1,4 – 20,0 мкм на роговице глаза и коже находится по табл. 53 подразд. 4.3, ПДУ энергетической экспозиции кожи в диапазоне 0,4 – 1,4 мкм – по этой же таблице.

ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения с длиной волны от 0,2 до 0,4 мкм. ПДУ энергетической экспозиции от каждого импульса на роговице и коже рассчитывается по формуле

$$H_{уф.имп} = H_{уф} / (f t n), \quad (281)$$

где  $H_{уф}$  определяется по табл. 48 подразд. 4.3;

$f$  – частота следования импульсов, Гц;

$t$  – длительность серии импульсов, с;

$n$  – количество серий импульсов за рабочий день.

ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения с длиной волны 0,4 – 1,4 мкм для роговицы глаза. ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от каждого импульса излучения с длиной волны 0,4 – 0,75 мкм, не вызывающей первичных  $H_{п.имп}$  и вторичных  $H_{в.имп}$  биологических эффектов, рассчитывается по формулам:

$$H_{п.имп} = H_{п}K_2 = H_1K_1K_2, \quad (282)$$

$$H_{в.имп} = H_2\Phi_p/(ftn), \quad (283)$$

где  $K_2$  – поправочный коэффициент на частоту повторения импульсов и длительность серии импульсов  $t$  (табл. 54 подразд. 4.3);

$n$  – количество серий импульсов за рабочий день.

При определении ПДУ по формулам (282) и (283) в качестве ПДУ выбирается наименьшее значение  $n = (\text{время рабочего дня}) / (\text{время непрерывной работы установки})$ .

ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения дальней инфракрасной области спектра для роговицы глаза. ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от каждого импульса излучения с длиной волны от 1,4 до 20,0 мкм определяется по формуле

$$H_{имп} = HK_3, \quad (284)$$

где  $H$  определяется по табл. 53 подразд. 4.3;

$K_3$  – поправочный коэффициент на частоту повторения импульсов и длительность серии импульсов (табл. 55 подразд. 4.3).

ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения для кожи. ПДУ энергетической экспозиции кожи от каждого импульса лазерного излучения с длиной волны 0,4 – 1,4 мкм вычисляется по формуле

$$H_{имп} = HK_2, \quad (285)$$

где  $H$  определяется по табл. 53,  $K_2$  – по табл. 54 подразд. 4.3.

ПДУ от каждого импульса лазерного излучения с длиной волны от 1,4 до 20,0 мкм определяется по формуле (284).

В диапазоне 0,4 – 1,4 мкм ПДУ энергетической экспозиции сетчатки для первичных эффектов в зависимости от длительности воздействия и диаметра пятна засветки на сетчатке выбирается по табл. 56 подразд. 4.3.

В диапазоне 0,4 – 0,75 мкм ПДУ энергии  $Q$  на сетчатке для вторичных биологических эффектов в зависимости от фоновой освещенности роговицы определяется по табл. 57 подразд. 4.3. Величина  $Q$ , определенная по данной таблице, сравнивается с величиной  $Q^*$ , значения которой в зависимости от длительности импульса и диаметра пятна засветки на сетчатке находим по табл. 58 подразд. 4.3. Если  $Q$  больше  $Q^*$ , то за ПДУ облучения глаз принимается  $H_c$ , в противном случае принимается  $Q$ .

Для расчета уровней лазерного излучения и лазерно-опасных зон (ЛОЗ) при прямом лазерном излучении пользуются следующей формулой:

$$H = \frac{4Q\beta_0\Gamma_0^2}{\pi(d_{\text{л}} + 2R\gamma)^2}, \quad (286)$$

где  $\beta_0$  и  $\Gamma_0$  – коэффициенты пропускания и увеличения оптической системы наблюдения (для невооруженного глаза  $\beta_0$  и  $\Gamma_0 = 1$ );

$d_{\text{л}}$  – начальный диаметр пучка, см;

$R$  – расстояние до расчетной точки, см;

$\gamma$  – угол расходимости луча, рад.

Характер лазерно-опасной зоны, создаваемой прямым лазерным излучением с равномерным распределением интенсивности, представлен на рис. 44.

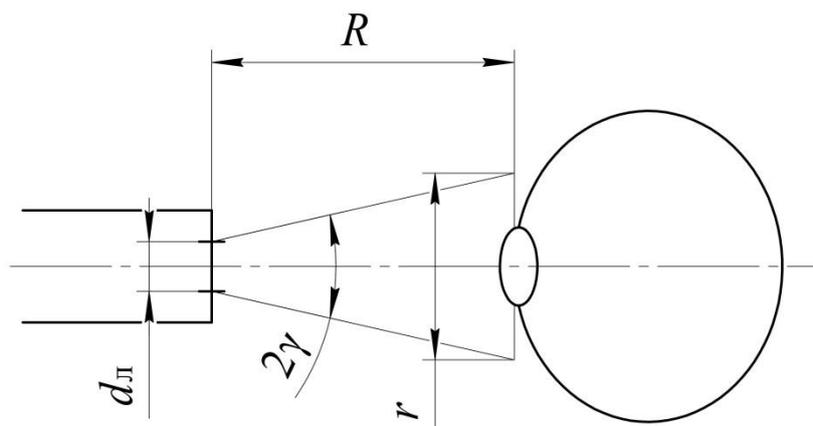


Рис. 44. Характер лазерно-опасной зоны, создаваемой прямым излучением

Задаваясь различными значениями величины  $R$ , подсчитывают значения  $H$ . Расстояние, при котором выполняется условие  $H = H_{\text{ПДУ}}$ , соответствует длине ЛОЗ  $l_{\text{ЛОЗ}}$  и определяется по выражению

$$l_{\text{ЛОЗ}} = \frac{0,5}{\gamma} \sqrt{\frac{4Q}{\pi H_{\text{ПДУ}} - d_{\text{л}}}}, \quad (287)$$

а наибольший радиус опасной зоны определяется так:

$$r_{\text{ЛОЗ}} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi H_{\text{ПДУ}}}}. \quad (288)$$

Расчет уровней облучения и ЛОЗ для отраженного от плоских зеркальных поверхностей излучения проводится с учетом уменьшения энергии излучения за счет коэффициента отражения по формуле (286).

При отражении лазерного излучения от поверхности плоской стеклянной оптической детали коэффициент отражения равен 0,04. Более точное значение находим по формуле

$$p = ((n - 1)/(n + 1))^2, \quad (289)$$

где  $n$  – коэффициент преломления материала оптической детали для длины волны излучения лазера.

Возможно отражение лазерного излучения от сферических зеркальных поверхностей (линз, объективов и т. д.). В этом случае уровни облучения роговицы глаза или кожи определяются по формуле

$$H = \frac{Qp}{\pi r^2}, \quad (290)$$

где  $r$  – радиус сечения отраженного луча, см;

– для выпуклой поверхности  $r = (d_{\text{л}} + 2\gamma R_1)(R_2 + r_{\text{сф}}/2)/r_{\text{сф}}$ ;

– для вогнутой поверхности  $r = (d_{\text{л}} + 2\gamma R_1)(R_2 + r_{\text{са}}/2)/r_{\text{сф}}$ ;

$R_1, R_2$  – расстояние от лазера до отражающей поверхности и от отражающей поверхности до расчетной точки;

$r_{\text{сф}}$  – радиус сферической поверхности.

Длиной ЛОЗ является расстояние, на котором рассчитанный уровень излучения равен предельно допустимому.

Кроме зеркального возможно также диффузное отражение (от потолка и стен помещения, экранов и мишеней, от поверхностей оборудования и одежды). Расчет уровней облучения рассеянным излучением в этом случае проводится по формуле

$$H = Qp \cos \Theta / (\pi R_2^2), \quad (291)$$

где  $\Theta$  – угол между направлением на расчетную точку и нормалью к поверхности (рис. 45);

$p$  – коэффициент отражения в зависимости от материала поверхности (табл. 59 подразд. 4.3).

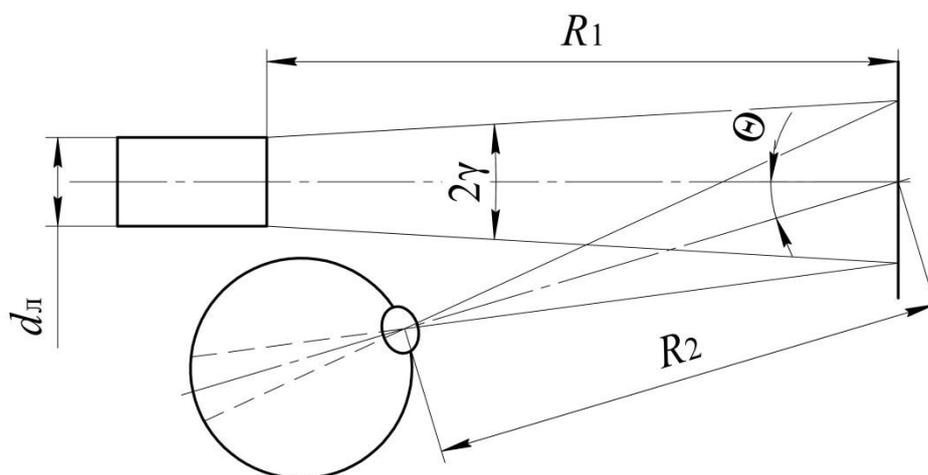


Рис. 45. Характер лазерно-опасной зоны при диффузном отражении (рассеянном излучении)

ЛЗОЗ, создаваемая диффузно отраженным излучением, определяется по формуле

$$L_{\text{ЛЗОЗ}} = \sqrt{\frac{Qp \cos \Theta}{\pi H_{\text{ПДУ}}}}. \quad (292)$$

Инженерно-технические методы защиты предусматривают создание безопасных лазерных установок уменьшением мощности применяемого лазера и надежной экранировкой лазерной установки. Кроме того, все оптические устройства и приспособления для визуального наблюдения за мишенью снабжаются защитными фильтрами с полосой поглощения, включающей частоту излучения лазера. Тип светофильтра (очков) можно выбрать согласно [25] по табл. 60 подразд. 4.3.

Оптическая плотность светофильтров характеризуется уровнем затемнения, являющимся обратной величиной прозрачности материала. Максимальная прозрачность материала для каждого диапазона

излучения в соответствии с уровнями затемнения вычисляется по формуле  $S = \left(\frac{7}{3}\right) D\nu + 1$ , где  $\nu$  – оптическая плотность, равная  $\lg r_\nu$  ( $r_\nu$  – коэффициент пропускания лазерного излучения прозрачными средами глаза).

Противолазерные фильтры создаются на основе поглощающих стекол или пластмасс, диэлектрических тонкопленочных отражателей, комбинированных, состоящих из поглощающих стекол и диэлектрических тонкопленочных отражателей.

Поглощающие стекла и пластмассы наиболее употребительны, дешевы и на некоторой длине волны поглощают до 90 % падающей на них световой энергии. Учитывая, что принцип защиты органа зрения в данном случае основан на поглощении световой энергии, которая, преобразуясь в тепловую, может привести к разрушению поглощающего фильтра (при высоких уровнях излучения), целесообразно устанавливать дополнительно на наружной (иногда на внутренней) стороне поглощающего фильтра тонкопленочные отражатели. Отражающие фильтры обладают выраженной частотной избирательностью; их изготавливают в основном из диэлектрических пленок на основе окислов титана или окислов кремния. При определенных частотах излучения может отражаться до 95 % падающей световой энергии.

Комбинированные многослойные светофильтры являются наилучшими и состоят из отражающих зеркал и поглощающих материалов.

В настоящее время в России и за рубежом созданы противолазерные очки, поглощающие световое излучение лазера в диапазоне, практически перекрывающем 0,20 – 1,25 мкм. Следует указать, что цветные стеклянные фильтры обеспечивают ослабление лазерного излучения не более чем в  $10^9$  раз.

Надежную защиту глаз от инфракрасного излучения газового лазера на углекислом газе создает фильтр, выполненный из двух пластинок плавленого кварца. Светофильтры противолазерных очков должны обеспечить снижение интенсивности облучения глаз до безопасной величины.

В качестве спецодежды для защиты от лазерного излучения используются халат и маска-шапочка, в этом случае уровень облучения рассчитывается по формуле

$$H = H_{\text{ПДУ}}/\varepsilon^m, \quad (293)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент пропускания ткани (ткань белая),  $\varepsilon = 0,06 - 0,08$ ;  
 $m$  – количество слоев ткани.

## 4.2. Пример расчета

Определить ПДУ облучения, границу ЛОЗ и средства защиты для лазерной технологической установки с  $\lambda = 0,69$  мкм. Длительность импульса – 10 с, частота – 10 Гц. Облучению подвергаются глаза и кожа оператора с диаметром пятна 100 мкм. Расстояние от точки наблюдения до поверхности – 0,5 м, угол между нормалью к поверхности и направлением наблюдения от 5 до 30 градусов. Фоновая освещенность 100 лк. Время неопределенной работы – 8 ч. Энергия лазерного импульса 100 Дж. Диаметр зрачка оператора 0,5 см. Класс опасности лазера – III.

### Решение

Определяем ПДУ энергетической экспозиции, не вызывающий первичных биологических эффектов, при угловом размере источника излучения по формуле (277).

$\alpha = 10^{-2} \cos(5^\circ \dots 30^\circ) / 50 = 1,7 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-4}$  рад – точечный источник. Для первичных биологических эффектов используются формулы (282) и (279).

$$H_1 = 7,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/см}^2 \text{ (табл. 49 подразд. 4.3),}$$

$$K_1 = 2,1 \text{ (табл. 50 подразд. 4.3),}$$

$$K_2 = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ (табл. 54 подразд. 4.3),}$$

$$H_{\text{п.имп}} = 7,1 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} = 0,64 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/см}^2.$$

Для вторичных биологических эффектов используется формула (282).

$$H_2 = 9,9 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2 \text{ (табл. 51 подразд. 4.3).}$$

$$H_{\text{в.имп}} = 9,9 \cdot 10^{-2} \cdot 100/10 \cdot 2,9 \cdot 10^4 = 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/см}^2.$$

В качестве ПДУ принимается величина  $0,64 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/см}^2$ . В соответствии с формулой (285) определяем ПДУ облучения кожи

$$H_{\text{имп}} = 4 \cdot 10^{-1} \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2.$$

Граница зоны, внутри которой отраженное излучение представляет опасность для глаз оператора, вычисляется по формуле (292)

$$L_{\text{ЛОЗ}} = \sqrt{100 \cdot 0,9 \cdot \cos 5^\circ / 3,14 \cdot 3,4 \cdot 10^{-5}} = 967 \text{ см} = 9,7 \text{ м.}$$

Для кожи лазерно-опасная зона рассчитывается путем замены  $H_{ПДУ}$  на значение ПДУ для кожи

$$L_{ЛОЗ} = \sqrt{100 \cdot 0,9 \cdot \cos 5^\circ / 3,14 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3}} = 140 \text{ см} = 1,4 \text{ м.}$$

Зону ограничения рассматриваем как зону повышенной опасности, так как в ней требуется использование средств индивидуальной защиты (СИЗ) глаз. Для уменьшения опасности поражения лазерным излучением на данной установке предусматривается использование лазерно-защитных очков со светофильтрами СЗС-22 [25]. Установки III класса опасности размещаются в отдельных помещениях, оборудуются внутренними замками, табло «Посторонним вход воспрещен» и знаком лазерной опасности в соответствии с [26].

### 4.3. Справочные таблицы

Таблица 46. Пороговые мощности (энергии) для повреждения сетчатки глаз излучением лазеров

Тип лазера и длина волны излучения	Объект воздействия	Пороговая мощность (энергия)	Длительность воздействия
Аргоновый газовый (488 и 514 нм)	Глазное дно	16 мВт	0,5с
		25 мВт	0,2 с
		100 мВт	0,2с
Гелий-неоновый газовый (632,8 нм)	То же	18 мВт	80,0 мс
		23 мВт	13,5 мс
		10 мВт	1с
		15 мВт	100 мс
		40 мВт	10 мс
Рубиновый импульсный в свободном режиме генерации (694,3 нм)	>>	0,2 мДж	7 мс
		0,5 мДж	1,7 мс
		3,0 мДж	7 мс
Тот же лазер в режиме модулированной добротности	>>	22 мкДж	10 нс
Неодимовый импульсный в режиме свободной генерации (1,06 мкм)	>>	1,0 мДж	7 мс
		4,7 мДж	6 мс

Тип лазера и длина волны излучения	Объект воздействия	Пороговая мощность (энергия)	Длительность воздействия
Тот же лазер в режиме модулированной добротности	Глазное дно	0,3 Дж/см <sup>2</sup>	40 нс
Иттербий-эрбиевый импульсный свободной генерации (1,54 мкм)	Роговица	7,2 Дж/см <sup>2</sup>	1 мс
Тот же лазер в режиме модулированной добротности	>>	4,7 Дж/см <sup>2</sup>	40 нс
Лазер на СО постоянного излучения	>>	3,8 Вт/см <sup>2</sup>	1 с
		20 – 30 Вт/см <sup>2</sup>	0,1 с
		80 Вт/см <sup>2</sup>	0,01 с

Таблица 47. Пороговые мощности для развития кожных реакций при действии излучения некоторых лазеров

Тип лазера и длина волны излучения	Пороговая энергия, кДж/м <sup>2</sup>	Длительность воздействия
Азотный газовый (334 нм)	200	210 с
Аргоновый газовый (458 – 515 нм)	40 – 82	1 с
Рубиновый импульсный в режиме свободной генерации (694,3 нм)	Непигментированная кожа – 110 – 200	2,5 мс
	Пигментированная кожа – 22 – 69	2,5 мс
Тот же лазер в режиме модулированной добротности	2,5 – 3,4	75 нс
Неодимовый импульсный в режиме модулированной добротности (1060 нм)	25 – 57	75 нс
Неодимовый в свободном режиме генерации (1064 нм)	460 – 780	1 с
Лазер на СО <sub>2</sub> постоянного излучения	28	1 с

Таблица 48. Энергетическая экспозиция в ультрафиолетовой области на роговице и коже за общее время облучения в течение рабочего дня

$\lambda$ , мкм	$H_{уф}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\lambda$ , мкм	$H_{уф}$ , Дж/см <sup>2</sup>
От 0,200 до 0,210	$1 \cdot 10^{-8}$	Свыше 0,290 до 0,300	$1 \cdot 10^{-5}$
Свыше 0,210 до 0,215	$1 \cdot 10^{-7}$	Свыше 0,300 до 0,370	$1 \cdot 10^{-5}$
Свыше 0,215 до 0,290	$1 \cdot 10^{-6}$	Свыше 0,370	$1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 49. Энергетическая экспозиция  $H_1$  на роговице глаза в зависимости от длительности воздействия  $\tau$  и углового размера источника излучения  $\alpha$  при максимальном диаметре зрачка глаза

$\tau$ , с	$\alpha$ , рад							
	До 0,001 (точечный)	Свыше 0,001 до 0,005	Свыше 0,00 до 0,01	Свыше 0,01 до 0,05	Свыше 0,05 до 0,1	Свыше 0,1 до 0,5	Свыше 0,5 до 1	Свыше 1 до 2,5
$10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$
$10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
$10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
$10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
$10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$
$10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
$10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$
$10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$
1	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-1}$
10	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$5,3 \cdot 10^{-1}$	1,2
10	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$9,8 \cdot 10^{-1}$	2,3
10	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-1}$	1,6	3,8
10	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	1,2	3,0	7,0
$3 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	1,6	4,0	1,2 – 10

Таблица 50. Поправочный коэффициент  $K_1$  на длину волны лазерного излучения и диаметр зрачка глаза

$d_3$ , см	Длина волны излучения, $\lambda$ , мкм						
	От 0,40 до 0,42	Свыше 0,42 до 0,45	Свыше 0,45 до 0,90	Свыше 0,90 до 1,10	Свыше 1,10 до 1,20	Свыше 1,20 до 1,30	Свыше 1,30 до 1,10
0,8	2,3	1,4	0,8	1,0	2,3	7,0	23
0,7	3,0	1,8	1,0	1,3	3,0	9,1	30
0,6	4,1	2,5	1,4	1,8	4,1	13	41
0,5	6,0	3,6	2,1	2,6	6,0	18	60
0,4	9,2	5,6	3,2	4,0	9,2	28	92
0,3	16	9,9	5,7	7,1	16	50	160
0,2	37	22	13	16	37	110	370

Таблица 51. Энергетическая экспозиция  $H_2$  роговицы глаза в зависимости от длины волны излучения и диаметра зрачка

$d_3$ , см	Длина волны излучения, $\lambda$ , мкм						
	От 0,40 до 0,44	Свыше 0,44 до 0,48	Свыше 0,48 до 0,62	Свыше 0,62 до 0,67	Свыше 0,67 до 0,71	Свыше 0,71 до 0,73	Свыше 0,73
0,8	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,62	2,6
0,7	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,81	3,4
0,6	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	1,1	4,7
0,5	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-2}$	1,6	6,8
0,4	0,12	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	0,15	2,5	16
0,3	0,20	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,27	4,4	18
0,2	0,45	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,61	9,9	42

Таблица 52. Зависимость диаметра зрачка глаза  $d_3$  от фоновой освещенности роговицы  $E_\phi$

Фоновая освещенность $E_\phi$ , лк	Диаметр зрачка $d_3$ , см	Фоновая освещенность $E_\phi$ , лк	Диаметр зрачка $d_3$ , см
0,01	0,8	2000	0,4
0,04	0,7	30000	0,3
8	0,6	300000	0,2
100	0,5	—	—

Таблица 53. ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза лазерным излучением с длиной волны свыше 1,4 мкм и кожи свыше 0,4 мкм в зависимости от длины волны  $\lambda$  и длительности импульса  $\tau$

Длительность импульса $\tau$ , с	Длина волны излучения $\lambda$ , мкм				
	От 0,4 до 0,73	Свыше 0,73 до 2,4	Свыше 2,4 до 5,6	Свыше 5,6 до 9,3	Свыше 9,3 до 20
$10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
$10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$
$10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
$10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-1}$	2	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-2}$	1	5	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
$10^{-1}$	4	20	2	$2 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-2}$
1	10	60	6	$6 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$10^1$	40	200	20	2	$8 \cdot 10^{-1}$
$10^2$	200	1000	100	10	4
$10^3$	800	4000	400	40	20
$10^4$	4000	20 000	2000	200	80
$3 \cdot 10^4$	8000	40 000	4000	400	200

Таблица 54. Поправочный коэффициент  $K_2$  на частоту повторения импульсов  $f$  и длительность воздействия серии импульсов  $t$

Длительность серии импульсов $t$ , с	Частота повторения импульсов $f$ , Гц					
	До 10	Свыше 10 до 50	Свыше 50 до 100	Свыше 100 до 250	Свыше 250 до 500	Свыше 500 до 1000
0,1	$5,7 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
1	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
10	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
100	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
1000	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
10000	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
30000	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Таблица 55. Поправочный коэффициент  $K_3$  на частоту повторения импульсов  $f$  и длительность воздействия серии импульсов  $t$

Длительность серии импульсов $t$ , с	Частота повторения импульсов $f$ , Гц					
	До 10	Свыше 10 до 50	Свыше 50 до 100	Свыше 100 до 250	Свыше 250 до 500	Свыше 500 до 1000
0,1	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
1	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$
10	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
100	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
1000	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
10000	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
30000	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Таблица 56. ПДУ энергетической экспозиции сетчатки  $H_c$ , не вызывающей биологических эффектов

Длительность импульса $\tau_i$ , с	Диаметр сетчатки глаза $d_c$ , см							
	До $1,7 \cdot 10^{-3}$	Свыше $1,7 \cdot 10^{-3}$ до $5,0 \cdot 10^{-3}$	Свыше $5,0 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^{-2}$	Свыше $1,0 \cdot 10^{-2}$ до $5,0 \cdot 10^{-2}$	Свыше $5,0 \cdot 10^{-2}$ до $1,0 \cdot 10^{-1}$	Свыше $1,0 \cdot 10^{-1}$ до $5,0 \cdot 10^{-1}$	Свыше $5,0 \cdot 10^{-1}$ до 1	Свыше 1 до 4
$10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
$10^{-7}$	1	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$10^{-6}$	2	$6 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
$10^{-5}$	3	1	$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$10^{-4}$	6	2	1	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$10^{-3}$	10	4	2	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$10^{-2}$	20	6	3	$6 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-1}$	30	0,1	6	1	$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
1	60	0,2	10	2	1	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$
$10^1$	100	40	20	4	2	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$
$10^2$	200	60	30	6	3	$6 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-2}$
$10^3$	300	100	60	10	6	1	$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
$10^4$	600	200	100	20	10	2	1	$3 \cdot 10^{-1}$
$3 \cdot 10^4$	800	300	100	30	10	3	1	$3 \cdot 10^{-1}$

Таблица 57. ПДУ энергии на сетчатке глаза  $Q$ , Дж, не вызывающей вторичных биологических эффектов

$\Phi_p$ , лк	Длина волны излучения, $\lambda$ , мкм						
	От 0,4 до 0,44	Свыше 0,44 до 0,48	Свыше 0,48 до 0,63	Свыше 0,63 до 0,67	Свыше 0,67 до 0,71	Свыше 0,71 до 0,74	Свыше 0,74 до 0,75
От $1 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$42 \cdot 10^{-6}$	$42 \cdot 10^{-7}$	$22 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$
От $5 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
От $5 \cdot 10^{-1}$ до 5	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-1}$
Свыше 5 до 50	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	3
Свыше 50 до 500	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	2	30
Свыше 500 до 5000	1	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	1	20	300
Свыше 5000 до 50000	10	2	$2 \cdot 10^{-1}$	1	10	200	3000
Свыше 50000 до 100000	100	20	2	10	100	2000	30000

Таблица 58. Значение  $Q$ , Дж, в зависимости от длительности импульса  $\tau$  и диаметра пятна засветки на сетчатке  $d_c$

$\tau$ , с	Диаметр пятна $d_c$ , см							
	До $1,7 \cdot 10^{-3}$ точечный источник	Свыше $1,7 \cdot 10^{-3}$ до $5,0 \cdot 10^{-3}$	Свыше $5,0 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^{-2}$	Свыше $1,0 \cdot 10^{-2}$ до $5,0 \cdot 10^{-2}$	Свыше $5,0 \cdot 10^{-2}$ до $1,0 \cdot 10^{-1}$	Свыше $1,0 \cdot 10^{-1}$ до $5,0 \cdot 10^{-1}$	Свыше $5,0 \cdot 10^{-1}$ до 1	Свыше 1 до 4
$10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
$10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$
$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
$10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
1	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-1}$
$10^1$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$
$10^2$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$
$10^3$	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	1
$10^4$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$	3
$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	1	4

*Таблица 59.* Значения коэффициента отражения  $\rho$  от материала отражающей поверхности

Материал	$\rho$	Материал	$\rho$
Бумага белая	0,95 – 0,98	Кожух прибора светло-серый	0,65 – 0,55
Светлая штукатурка	0,4 – 0,9	Черная бумага	0,04 – 0,05
Белая ткань, халат	0,65 – 0,55	Черный бархат	0,002

*Таблица 60.* Марки стекол, рекомендуемые для использования в противолозерных очках

Длина волны, мкм	0,48 – 0,51	0,53	0,69	0,84	1,06	1,54	10,6
Марка стекла [25]	ОС-12*	ОС-12	СЗС-2Р*	СЗС-21	СЗС-21	СЗС-24	БС-15**
	ОС-13	ОС-13	СЗС-22	СЗС-22	СЗС-22	СЗС-25	–
	ОС-23-1	ОС-23-21	–	–	СЗС-24	СЗС-26	–

\* Оранжевое стекло

\*\* Бесцветное стекло

### Контрольные вопросы

1. На сколько классов делятся лазеры по степени опасности генерируемого излучения?
2. Какую опасность для человека представляют лазеры первого класса?
3. Какую опасность для человека представляют лазеры второго класса?
4. Какую опасность для человека представляют лазеры третьего класса?
5. Какую опасность для человека представляют лазеры четвертого класса?
6. Что является зеркально отраженным лазерным излучением?
7. Что является диффузно отраженным лазерным излучением?

8. В чем особенность воздействия лазерного излучения на организм человека?

9. Какие эффекты могут возникнуть в биологической ткани под воздействием лазерного излучения?

10. В чем суть теплового эффекта в биологических тканях?

11. Сколько существует диапазонов ультрафиолетового излучения?

12. Как влияет ультрафиолетовое излучение на организм человека?

13. Сколько существует диапазонов инфракрасного излучения?

14. Как влияет инфракрасное излучение на организм человека?

15. Каким нормативным документом регламентируется лазерная безопасность?

16. Что является основным нормируемым параметром лазерного излучения?

17. Как вычисляется энергетическая экспозиция?

18. Что такое ПДУ лазерного излучения?

19. Что такое ЛОЗ?

## Глава 5. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

### 5.1. Основные светотехнические характеристики

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное психофизиологическое воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

Зрение во всей системе органов чувств человека занимает доминирующее положение. Установлено, что на органы зрения приходится 90 % всей получаемой информации.

Освещение характеризуется количественными и качественными показателями.

К количественным показателям относятся:

1. *Световой поток*  $\Phi$  – часть лучистого потока, воспринимаемая зрением человека как свет; характеризует мощность светового излучения, измеряется в люменах (лм);

2. *Сила света*  $I$  – пространственная плотность светового потока; определяется как отношение светового потока  $d\Phi$ , исходящего от источника и равномерно распространяющегося внутри элементарного телесного угла  $d\Omega$ , к величине этого угла  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ ; измеряется в канделах (кд);

3. *Освещенность*  $E$  – поверхностная плотность светового потока; определяется как отношение светового потока  $d\Phi$ , равномерно падающего на освещенную поверхность  $dS$ , к ее площади  $E = \frac{d\Phi}{dS}$ ; измеряется в люксах (лк);

4. *Яркость*  $B$  поверхности под углом  $\alpha$  к нормали – это отношение силы света  $dI$ , излучаемого освещаемой или светящейся поверхностью в этом направлении, к площади  $dS$  проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную к этому направлению, т. е.  $B = \frac{dI}{dS \cos \alpha}$ ; измеряется в кд · м<sup>2</sup>.

Для качественной оценки условий зрительной работы используют такие показатели, как фон, контраст объекта с фоном, коэффициент пульсации освещенности, спектральный состав света.

5. *Фон* – это поверхность, на которой происходит различение объекта. Фон характеризуется способностью поверхности отражать падающий на нее световой поток. Эта способность (коэффициент отражения  $\rho$ ) определяется как отношение отраженного от поверхности светового потока  $\Phi_{\text{отр}}$  к падающему на нее световому потоку  $\Phi_{\text{пад}}$ , т. е.

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_{\text{пад}}}. \quad (294)$$

В зависимости от цвета и фактуры поверхности значения коэффициента отражения находятся в пределах 0,02 ... 0,95.

6. *Контраст объекта с фоном*  $K$  – степень различения объекта и фона – характеризуется соотношением яркостей рассматриваемого объекта (точка, линия, знак, пятно, трещина, риска или другие элементы, которые требуется различить в процессе работы); определяется по формуле

$$K = \frac{B_o - B_\phi}{B_\phi}, \quad (295)$$

где  $B_o$  и  $B_\phi$  – яркость объекта и фона.

Пороговый, или наименьший различимый глазом контраст, при небольшом уменьшении которого объект становится неразличимым на этом фоне, равен 0,01.

7. *Коэффициент пульсации освещенности*  $K_E$  – это критерий глубины колебания освещенности в результате изменения во времени светового потока. Коэффициент пульсации  $K_E$  рассчитывается по формуле

$$K_E = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{2E_{\text{cp}}}, \quad (296)$$

где  $E_{\text{max}}$ ,  $E_{\text{min}}$ ,  $E_{\text{cp}}$  – максимальное, минимальное, среднее значения освещенности за период колебаний; для газоразрядных ламп  $K_E = 25 - 65 \%$ ; для обычных ламп  $K_E = 7 \%$ , а для галогенных  $K_E = 1 \%$ .

## 5.2. Системы и виды производственного освещения

При освещении производственных помещений используют *естественное освещение*, создаваемое прямыми солнечными лучами, рассеянным светом небосвода и меняющееся в зависимости от географической широты, времени года, суток, степени облачности и прозрачности

атмосферы; *искусственное освещение*, создаваемое электрическими источниками света, и *совмещенное освещение*, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняют искусственным.

Конструктивно естественное освещение подразделяется на *боковое* (одно- и двухстороннее), осуществляемое через световые проемы в наружных стенах; *верхнее*, осуществляемое через аэрационные и защитные фонари, проемы в кровле и перекрытиях; *комбинированное* – сочетание верхнего и бокового освещения.

Искусственное освещение по конструктивному исполнению может быть двух видов – *общее* и *комбинированное*. Система общего освещения применяется в помещениях, где по всей площади выполняются однотипные работы (литейные, сборочные, гальванические цеха, а также в административных, конторских и складских помещениях).

При выполнении точных зрительных работ (слесарные, токарные, фрезерные, контрольные и тому подобное работы) в местах, где оборудование создает глубокие, резкие тени или рабочие поверхности расположены вертикально (штампы, гильотинные ножницы), наряду с общим освещением применяют местное. Совокупность местного и общего освещения называют комбинированным освещением. Применение одного местного освещения внутри производственных помещений не допускается, поскольку образуются резкие тени, зрение быстро утомляется и создается опасность производственного травматизма.

### **5.3. Источники света и осветительные приборы**

Источники света, применяемые для искусственного освещения, делятся на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Лампы накаливания относятся к источникам света теплового излучения. Видимое излучение в них получается в результате нагрева электрическим током вольфрамовой нити. В газоразрядных лампах излучение оптического диапазона спектра возникает в результате электрического разряда в атмосфере инертных газов и паров металла, а также за счет явления люминесценции, которое невидимое ультрафиолетовое излучение преобразует в видимый свет.

При выборе и сравнении источников света друг с другом пользуются следующими параметрами:

- номинальное напряжение питания  $U$ , В;
- электрическая мощность лампы  $P$ , Вт;

- световой поток  $\Phi$ , лм, или минимальная сила света  $I$ , кд;
- световая отдача  $\psi = \frac{\Phi}{P}$ , лм/Вт, т. е. отношение светового потока лампы к ее электрической мощности;
- срок службы;
- спектральный состав света.

Создание в производственных помещениях качественного и эффективного освещения невозможно без применения рациональных светильников. Электрический светильник – это совокупность источника света и осветительной арматуры, предназначенной для перераспределения излучаемого источником светового потока в требуемом направлении, предохранения глаз рабочего от слепящего действия ярких элементов источника света, защиты источника света от механических повреждений воздействия окружающей среды и эстетического оформления помещения.

#### **5.4. Выбор метода расчета освещения**

Светотехнические расчеты могут быть выполнены методом коэффициента использования светового потока или точечным методом.

Метод коэффициента использования светового потока целесообразно применять для расчета общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей при отсутствии больших затенений. При расчетах этим методом учитывается как прямой, так и отраженный свет.

Точечный метод применяется для расчета общего локализованного освещения, для общего равномерного освещения при наличии существенных затенений. Точечный метод используется для расчета освещенности как угодно расположенных поверхностей. Отраженная составляющая освещенности учитывается приближенно. Освещение открытых пространств на минимальную освещенность и местное освещение рассчитывается, как правило, точечным методом.

##### **5.4.1. Метод коэффициента использования светового потока**

При расчетах освещения методом коэффициента использования световой поток  $\Phi$  находится по формуле

$$\Phi = \frac{ESK_3Z}{N\eta\gamma}, \quad (297)$$

где  $E$  – требуемая регламентированная освещенность, лк;

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

$K_3$  – коэффициент запаса;

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения;

$N$  – количество рядов светильников;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока в долях единицы;

$\gamma$  – коэффициент затенения.

*Освещенность  $E$ , лк.* Обычно ее значение регламентируется нормативным документом. Основным нормативным документом является [27]. В табл. 83, 84 подразд. 5.7 приведены значения нормативной освещенности  $E$  для производственных, жилых, общественных, административно-бытовых помещений. При всех заданных других величинах из формулы (297) может быть определена ожидаемая освещенность  $E$ .

*Коэффициент запаса  $K_3$*  учитывает снижение освещения в процессе эксплуатации из-за загрязнения и старения светопрозрачных заполнений в световых проемах, источников света (ламп) и светильников, а также снижение отражающих свойств поверхностей помещения (табл. 85 подразд. 5.7).

*Коэффициент неравномерности освещения  $Z$*  характеризует отношение средней освещенности к минимальной  $\left(\frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{min}}}\right)$ . Он в наибольшей степени зависит от отношения расстояния между светильниками к расчетной высоте  $\left(\frac{L}{h} = \lambda\right)$ . Резко возрастает значение  $Z$ , если  $\lambda$  сильно отличается от рекомендованных значений (табл. 61). При  $\lambda$ , не превышающем рекомендованных значений в табл. 61, можно принимать  $Z = 1,5$  – для ламп накаливания и дугоразрядных ламп и  $Z = 1,1$  – для люминесцентных ламп при расположении светильников в виде светящихся линий. Для отраженного освещения можно считать  $Z = 1,0$ , при расчете на среднюю освещенность  $Z$  не учитывается.

Таблица 61. Значения  $\lambda$  для светильников с типовыми кривыми

Типовая кривая	$\lambda_c$	$\lambda_3$
Концентрированная	0,6	0,6
Глубокая	0,9	1,0
Косинусная	1,4	1,6
Равномерная	2,0	2,6
Полуширокая	1,6	1,8

Количество рядов светильников  $N$ , как правило, намечается до расчета.

При выбранном типе светильника и ламп световой поток лампы в каждом светильнике  $\Phi_1$  может иметь два-три различных значения. Число светильников в одном ряду  $N_1$  определяется как

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_1}, \quad (298)$$

где  $\Phi$  – световой поток одного ряда светильников.

Суммарная длина  $N_1$  светильников в ряду сопоставляется с длиной помещения и возможны следующие случаи:

а) длина светильников в ряду превышает длину помещения. В этом случае необходимо или увеличить количество рядов  $N$ , или компоновать ряды из сдвоенных, строенных светильников, или использовать более мощные лампы;

б) длина светильников в ряду равна длине помещения. Светильники располагаются в виде непрерывного ряда светильников;

в) длина светильников в ряду меньше длины помещения. Светильники в ряду располагают с равномерно распределенными по длине ряда разрывами.

Коэффициент затенения  $\lambda$  следует вводить только для помещений (таких как конторы, чертежные залы), где положение работающего строго фиксировано и создает частичное затенение, его значение берут около 0,8.

#### **5.4.2. Алгоритм расчета освещения методом коэффициента использования светового потока**

Алгоритм расчета освещения методом коэффициента использования светового потока включает ряд рекомендаций и разъяснений. Порядок и выполнение отдельных пунктов алгоритма можно изменять, учитывая исходные данные для расчета освещенности.

**Определение нормативной освещенности.** Для определения нормативной освещенности  $E$  по табл. 83 подразд. 5.7 необходимо:

1. Установить разряд зрительных работ I – VIII (графа 3 в табл. 83 подразд. 5.7) исходя из характера зрительной работы, из наименьшего и эквивалентного размера объекта различения, мм (графа 2 в табл. 83 подразд. 5.7). Объект различения – рассматриваемый предмет, отдельная его часть или дефект, которые требуется различить в процессе работы.

2. Оценить значения коэффициентов отражения объекта различения  $\rho_o$  и фона  $\rho_\phi$  по табл. 62 с учетом материалов, из которых они выполнены.

Таблица 62. Значение коэффициента отражения  $\rho$  некоторых материалов

Материал	$\rho$ , %	Материал	$\rho$ , %
Стекло: молочное, матовое	До 50	Белая жемчужная	60 – 70
	8 – 20	Побеленные стены и потолки: новые	65 – 75
Эмаль фарфоровая белая	65 – 75	к концу срока службы	25 – 40
Бумага писчая	60 – 70	Кирпич красный	8 – 10
Бумага ватманская	67 – 82	Силикатный кирпич	20 – 25
Бархат черный	6	Бетон: чистый	20 – 25
Алюминий матовый	55 – 75	покрытый темной пылью	5 – 10
Зеркало алюминированное	70 – 84	Белила свинцовые	90
Латунь: матовая полированная	55 – 65	Паркет	10 – 15
	60 – 70	Белый кафель	75
Сталь полированная	50 – 55	Линолеум: светлый,	16
		темный	10

*Фон* – поверхность, прилегающая непосредственно к объекту различения, на которой он расположен.

3. Рассчитать контраст объекта с фоном  $K$  по формуле

$$K = \frac{\rho_o - \rho_\phi}{\rho_\phi}. \quad (299)$$

4. Классифицировать характеристики фона и контраста, исходя из того, что фон считается:

- *светлым* при коэффициенте отражения поверхности  $\rho_\phi > 0,4$ ;
- *средним* при  $0,2 < \rho_\phi < 0,4$ ;
- *темным* при  $\rho_\phi < 0,2$ .

Контраст объекта различения с фоном считается:

- *большим* при  $K > 0,5$  (объект и фон резко различаются по яркости);
- *средним* при  $0,5 > K > 0,2$  (объект и фон заметно различаются по яркости);
- *малым* при  $K < 0,2$ .

Пороговое значение контраста объекта различения с фоном равно 0,01.

5. Определить подразряд зрительных работ (графа 4 в табл. 83 подразд. 5.7). Для этого находят в графах 5, 6 данной таблицы сочетания характеристик фона и контраста, полученные в п. 4.

6. Виды освещения: общее и комбинированное. При комбинированном освещении к общему освещению добавляется местное. В производственных условиях использование одного местного освещения не допускается.

В графах 7, 8, 9 табл. 86 подразд. 5.7 даны нормативные значения освещенности  $E$  для каждого вида освещения.

**Источники света и их выбор.** В соответствии со [27] для освещения помещений рекомендуется использовать, как правило, наиболее экономные разрядные лампы. Использование ламп накаливания для общего освещения допускается в случае невозможности или технико-экономической нецелесообразности использования разрядных ламп.

Для местного освещения кроме разрядных источников света можно использовать лампы накаливания, в том числе галогенные.

Применение неоновых ламп внутри помещения не допускается.

**Люминесцентные лампы (ЛЛ)** имеют высокую световую отдачу (50 – 100 лм/Вт), большой срок службы (8000 – 14000 ч), что делает их более экономичными по сравнению с лампами накаливания, имеют лучшую цветопередачу, относительно малую яркость (хотя и создают ослепленность). Однако для ЛЛ требуется более сложная схема включения, ограничение температурных условий для нормальной работы (при температуре меньше 10 °С они не зажигаются) и групповое использование для снижения вредных влияний пульсации светового потока. К недостаткам ЛЛ относятся также малая единичная мощность при больших размерах ламп и значительное снижение светового потока к концу срока службы, большой коэффициент пульсации 25 – 65 %.

Большое значение имеет правильный выбор специального типа ламп. Люминесцентные лампы превосходят по качеству цветопередачи лампы накаливания, однако не полностью приближаются к естественному свету из-за излучения в красной части спектра. В настоящее время ближе других к естественному спектру считаются лампы ЛХБЦ.

При производстве люминесцентных ламп низкого давления большое внимание уделяется экономии сырья для их изготовления, при этом потребляемая лампой мощность уменьшилась на 7 – 8 % при прежнем уровне светового потока (серия ЭЛЛ различных цветностей мощностью 18, 36, 58 Вт, лампы типа ЛБ 18-1, ЛДЦ 18, ЛБ 36, ЛДЦ 36, ЛБ 58).

**Газоразрядные лампы высокого давления (ГЛВД)** применяются в условиях, когда требуется высокая световая отдача при компактности источника света и стойкости к условиям внешней среды. К таким типам ламп относятся металлогенные лампы МГЛ (мощностью 2500 – 2000 Вт), натриевые лампы НЛВД (70, 100, 150 Вт), зеркальные МГЛ типа ДРИЗ (250, 400, 700 Вт), имеющие светоотдачу 110 – 130 лм/Вт.

Металлогенные лампы типа ДРИ внешне отличаются от ламп ДРЛ отсутствием люминофорного покрытия колбы; имеют высокую светоотдачу (100 лм/Вт), лучший спектральный состав света. Однако срок их службы меньше, чем у ДРЛ, и схема включения сложнее.

**Лампы накаливания (ЛН).** Отличительная особенность этих ламп – включение в сеть без дополнительных пусковых устройств, они могут работать при значительных колебаниях сетевого напряжения, практически не зависят от условий окружающей среды и температуры, компактны, световой поток незначительно снижается к концу срока службы (приблизительно на 15 %). Однако имеют низкую светоотдачу (7 – 20 лм/Вт), малый срок службы (1000 ч), в спектре преобладают желто-красные лучи, с повышением напряжения питания возрастает температура накала нити и свет становится белее, быстро возрастает световой поток, но одновременно с этим уменьшается срок службы.

Для условий производства как закрытых рабочих площадей, так и открытых участков имеет значение направленное усиление светового потока, что достигается наличием отражающих поверхностей. К такого рода лампам накаливания относятся лампы-светильники с зеркальными или диффузионными отражающими слоями на колбах.

Весьма перспективной разновидностью ЛН являются галогенные лампы накаливания. Они имеют трубчатую форму с цилиндрическими, керамическими или ножевыми металлическими цоколями и отличаются

от обычных особой компактностью, более белым светом, улучшенной цветопередачей, вдвое большим сроком службы. Эти лампы при эксплуатации должны находиться только в горизонтальном положении. Отклонение допускается не более  $4^\circ$ .

Рекомендуемые источники света для различных производственных помещений и систем освещения даны в табл. 86, 87 подразд. 5.7.

**Выбор светильников.** Светильники выбираются с учетом:

- используемых источников света и системы освещения;
- светотехнических характеристик;
- требований электробезопасности;
- энергетических показателей;
- эстетики.

Светотехническими характеристиками светильников являются кривые силы света, соотношение потоков, излучаемых в верхнюю и нижнюю полусферы, коэффициент полезного действия и защитные углы.

Установлено семь типовых кривых силы света (рис. 46): К – концентрированная; Г – глубокая; Д – косинусная; Л – полуширокая; Ш – широкая; М – равномерная; С – синусная.

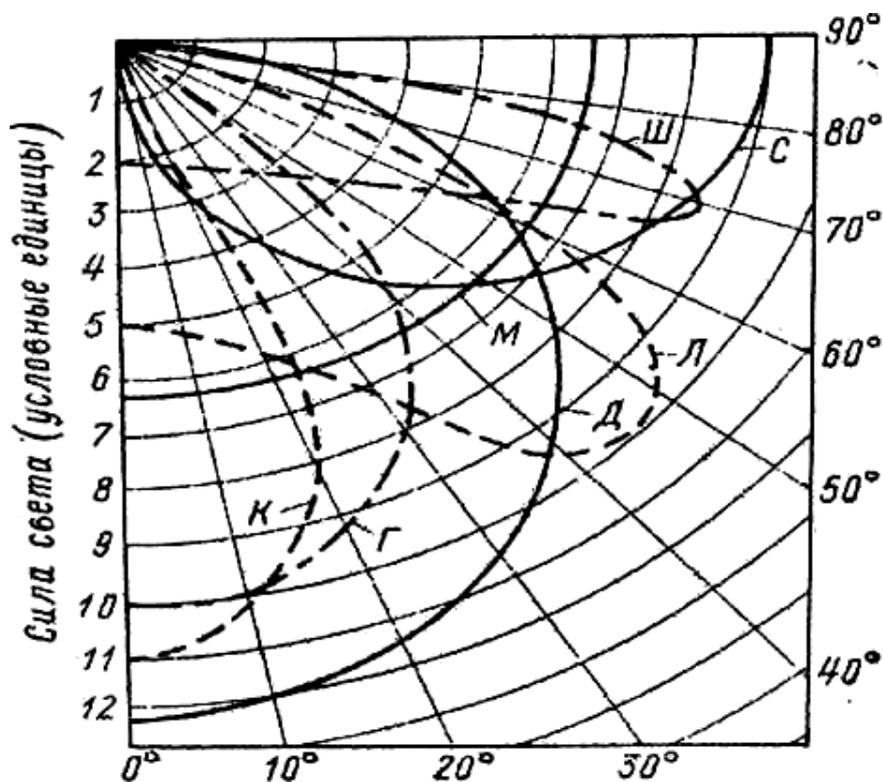


Рис. 46. Типовые кривые силы света

Для обеспечения высокой равномерной вертикальной освещенности в любой точке рекомендуются светильники с характеристикой Д (серии ДСП 02: ДСП 02 – 2 40/Д 00-01, ДСП 04; с диффузным отражателем: ДСП 04 – 2 40/Д 64; «Астра-1»: НСП 01 100/Д 03-01-У4), в отдельных случаях с М.

Для уменьшения слепящего действия света выбирают светильники с защитным углом  $\gamma$ , создаваемым отражателем (рис. 47, а) или экранирующими решетками (рис. 47, б).

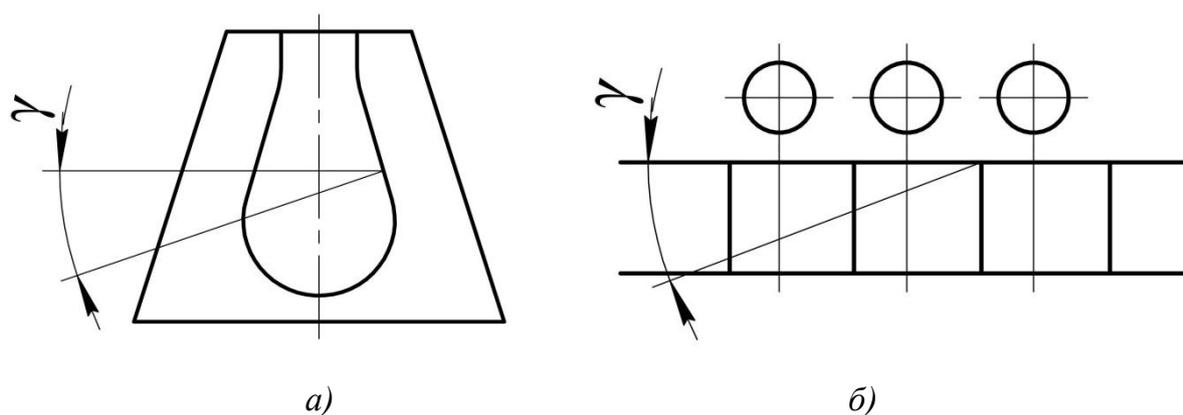


Рис. 47. Защитный угол светильников с отражателем и экранирующей решеткой

При выборе светильников по условиям среды обязательны требования к изготовлению для эксплуатации в пожароопасных и взрывоопасных помещениях с учетом изготовления по пыле- и влагозащите.

В структуре шифра светильника по стандарту первая буква обозначает источник света (Н – для лампы накаливания общего применения; Л – для прямых трубчатых люминесцентных ламп; Р – для ламп типа ДРЛ; Ж – для натриевых ламп).

Требования по электробезопасности определены «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ). Согласно ПУЭ ток защитных аппаратов на групповых линиях не должен превышать 25 А; при газоразрядных лампах – 125 Вт и выше; в лампах накаливания 500 Вт и выше – 63 А. Количество ламп на группу не должно, как правило, превышать 20, а при люминесцентных светильниках на две и более лампы – не более 50.

**Расположение и установка светильников.** Размещение светильников в плане (рис. 48, а, б) и разрезе (рис. 49) определяется следующими размерами:

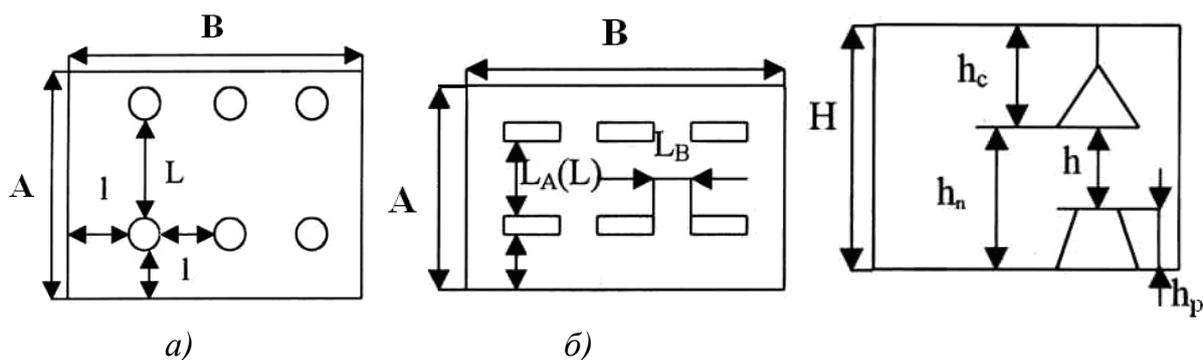


Рис. 48. Схема расположения светильников в плане

Рис. 49. Схема  
расположения  
светильников в разрезе

$H$  – высота помещения,  $A$  и  $B$  – ширина помещения;  $h_c$  – высота свеса светильника (расстояние от потолка до светильника)  $h_n = H - h_c$  – высота светильника над полом;  $h_p$  – высота расчетной (рабочей) поверхности над полом;  $h = h_n - h_p$  – расчетная высота повеса;  $L$  – расстояние между соседними светильниками или рядами светильников (если по длине и ширине помещения расстояния различны, то они обозначаются  $L_A$  и  $L_B$ );  $l$  – расстояние от крайних светильников или рядов светильников до стены.

На рис. 48, *а* показано размещение светильников при использовании ламп накаливания, на рис. 48, *б* – при люминесцентных лампах.

Светильники с люминесцентными лампами в производственных помещениях рекомендуется устанавливать рядами, преимущественно параллельно длинной стороне помещения. Некоторые преимущества имеют непрерывные ряды или ряды с небольшими разрывами между светильниками.

При выборе расположения светильников необходимо обеспечить доступность их обслуживания. Обслуживание с приставных лестниц и стремянок разрешается при  $h_n < 5$  м. При  $h_n > 5,0$  м возможные доступы для обслуживания:

- а) с мостовых кранов;
- б) со специальных мостиков, предназначенных для обслуживания светильников;
- в) с различных самоходных устройств, несущих корзину для монтера.

Трудность доступа к светильникам при больших  $h_n$  стремятся компенсировать установкой светильников на стенах на кронштейнах.

Это возможно лишь в помещениях шириной не более  $2h_{п}$  при отсутствии затенений.

Помимо доступности для обслуживания важное значение имеет соотношение расстояния между светильниками  $L$  к расчетной высоте  $h$ . Уменьшение величины  $\lambda = \frac{L}{h}$  удорожает устройство и обслуживание освещения, приводит к применению ламп с пониженной светоотдачей, а чрезмерное увеличение ведет к резкой неравномерности освещенности и в условиях нормирования освещенности – к возрастанию расходов энергии.

Рекомендуемые значения  $\lambda$  приведены в табл. 61. Значения  $\lambda_c$  рекомендуется использовать в случаях, когда увеличение  $\lambda$  не приведет к применению ламп с увеличенной светоотдачей (в частности, при люминесцентных лампах), значения  $\lambda_3$  – во всех остальных случаях. К увеличению  $\lambda$  сверх  $\lambda_3$  следует относиться осторожно, так как это приводит к ухудшению качества освещения.

При выборе расчетной высоты подвеса  $h$  можно ориентироваться исходя из площади помещения (табл. 63). С учетом выбранного оптимального значения  $\lambda$  расстояние между соседними светильниками  $L$  будет равно  $L = h\lambda$ . Расстояние от крайних светильников или рядов светильников до стен  $l$  берут равным  $l = (0,3 - 0,5)L$  в зависимости от наличия вблизи стен рабочих мест.

Светильники с точечными источниками света располагают по вершинам квадратных, прямоугольных, треугольных полей. При прямоугольных полях рекомендуется  $\frac{L_A}{L_B} < 1,5$ , причем увеличение  $L$  в одном направлении следует компенсировать увеличением его в другом.

Таблица 63. Выбор высоты подвеса ламп в зависимости от площади помещения

Индекс помещения	Площадь помещения при расчетной высоте подвеса, м								
	2,5	2,7	3	3,4	4	4,3	4,6	5,2	5,7
0,6	11,8	13,5	17,7	22,6	30,5	35,0	45	52	62
0,7	15,6	18,0	23,5	30	40	46,5	60	70	83
0,8	20,1	23,2	30	38,5	52	60	76	90	106
0,9	25	29	37,7	48	65	75	96	111	132
1,0	30	35,2	46	58	80	91	117	136	162

Окончание табл. 63

Индекс помещения	Площадь помещения при расчетной высоте подвеса, м								
	2,5	2,7	3	3,4	4	4,3	4,6	5,2	5,7
1,1	37	44	58	73	100	114	147	170	203
1,25	52	61	80	101	137	157	203	233	280
1,5	73	85	110	142	191	219	282	327	390
1,75	97	112	147	188	253	291	351	433	515
2,0	125	144	189	241	325	375	480	555	660
2,25	156	180	236	301	407	460	600	700	830
2,5	210	244	317	406	545	630	810	930	1120
3,0	295	340	440	560	760	870	11300	1300	1560

### Определение коэффициента использования светового потока.

На величину коэффициента использования светового потока  $\eta$  оказывают влияние отражающая способность потолка, стен, рабочей поверхности, пола, индекс помещения, геометрические размеры помещения и тип светильника.

Отражающая способность потолка, стен, рабочей поверхности и пола характеризуется коэффициентами отражения потолка  $\rho_{\text{п}}$ , стен  $\rho_{\text{с}}$ , рабочей поверхности, пола  $\rho_{\text{р}}$ . Фактическое значение этих коэффициентов определить трудно, поэтому рекомендуется применять ориентировочные значения, руководствуясь оценками состояния отражающих поверхностей, приведенными в табл. 64.

Таблица 64. Значение коэффициентов отражения потолка, стен, рабочей поверхности

Характеристика отражающей поверхности	Коэффициент отражения, %
Побеленный потолок; побеленные стены с окнами, закрытыми белыми шторами	70
Побеленные стены при незавешенных окнах; побеленный потолок в сырых помещениях; чистый бетонный и светлый деревянный потолки	50
Бетонный потолок в грязных помещениях; деревянный потолок; бетонные стены с окнами; стены, оклеенные светлыми обоями	30
Стены и потолки в помещениях с большим количеством темной пыли; сплошное остекление без штор; красный кирпич неоштукатуренный; стены с темными обоями	10

Характеристика отражающей поверхности	Коэффициент отражения, %
Белая фасадная краска, белый мрамор	70
Серый бетон, известняк, желтый песчаник, светло-зеленая, светло-серая фасадная краска, светлые породы мрамора	50
Розовый силикатный кирпич, темно-голубая, темно-бежевая, светло-коричневая фасадная краска, потемневшее дерево	30
Черный гранит, мрамор	10

Индекс помещения  $i$  определяется по формуле

$$i = \frac{S}{h(A + B)}, \quad (300)$$

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

$h$  – расчетная высота подвеса (расстояние от светильника до рабочей поверхности), м;

$A$  и  $B$  – ширина и длина помещения, м.

Значение коэффициента использования светового потока может быть определено по табл. 65 – 66. Обращение к той или иной таблице связано с типом источника светильника, используемого в системе освещения.

Сортамент светильников и светотехнические характеристики светильников очень разнообразны. Если в таблицах не приведены данные по конкретному типу светильника, то в них даны значения коэффициентов использования светового потока с типовыми кривыми силы света (М, Д, Г), излучаемого в нижнюю полусферу.

#### **5.4.3. Пример расчета освещения методом коэффициента использования светового потока**

Для производственного помещения размерами  $5 \times 7,5$  м и высотой 3,5 м рассчитать общее равномерное освещение. В помещении побеленные потолки, стены с небольшим количеством пыли, незанавешенные окна. Зрительные условия труда характеризуются минимальным объектом различения 0,7 мм, выполненным из матового алюминия, фон – сталь.

Таблица 65. Коэффициенты использования светового потока.  
Светильники с люминесцентными лампами

Тип светильника	Светильники группы 1				Светильники группы 2				Светильники группы 3				Светильники группы 4				Светильники группы 5			
	$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$	$i$	$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$	$i$	$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$	$i$	$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$	$i$	$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$	$i$
	70	70	50	30	70	70	50	30	70	70	50	30	70	70	50	30	70	70	50	30
	50	50	30	10	50	50	30	10	50	50	30	10	50	50	30	10	50	50	30	10
	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10
	Коэффициенты использования, %																			
0,5	28	27	21	18	30	28	20	16	26	24	20	17	25	25	19	14	22	18	13	11
0,6	33	32	25	22	34	32	24	20	32	31	25	21	31	29	22	18	25	23	17	14
0,7	38	36	30	26	38	36	29	24	37	35	29	26	36	33	26	22	28	27	20	16
0,8	42	39	33	29	42	40	32	27	41	38	32	28	39	36	30	25	31	29	23	19
0,9	46	42	37	32	47	43	36	30	45	41	36	32	43	40	33	28	34	32	26	21
1,0	49	45	40	35	50	46	39	33	48	44	39	35	46	43	36	30	37	34	28	23
1,1	52	48	42	38	53	49	41	35	50	46	41	37	49	45	38	32	39	36	30	25
1,25	55	50	45	40	56	52	44	38	53	48	43	39	52	47	40	35	42	38	32	27
1,5	60	54	49	45	61	56	48	42	57	52	48	44	56	51	44	38	46	42	36	30
1,75	63	57	52	48	65	59	52	46	60	55	51	47	59	54	47	42	49	44	38	33
2	65	59	55	51	68	61	54	48	63	57	53	49	62	56	49	44	51	46	40	35
2,25	68	62	57	53	70	64	56	50	65	59	55	51	64	58	51	46	53	48	42	37
2,5	70	63	58	55	73	66	58	52	67	60	56	53	66	60	53	48	55	50	43	39
3	73	65	61	58	76	68	60	55	70	62	58	55	69	62	55	50	58	52	45	41
3,5	75	67	62	60	78	69	62	57	71	64	60	57	71	63	56	51	60	53	47	43
4	77	68	64	61	80	71	64	59	73	65	61	59	73	64	58	53	61	54	48	44
5	80	70	67	65	84	74	67	62	77	67	64	62	77	67	60	56	65	57	51	48

Продолжение табл. 65

Тип светильника	Светильники группы 6				Светильники группы 7				ПВЛМ-2Х40; 2Х80 с лампами: ЛБР				ПВЛМ-Р с лампами ЛБР				ПВ ЛМ- 1Х40; 1Х80 с лампами ЛБР			
	$\rho_{п}, \%$	70	70	50	30	70	70	50	50	70	70	50	30	70	70	50	30	70	70	50
$\rho_{с}, \%$	50	50	30	10	50	50	50	30	50	50	30	10	50	50	30	10	50	50	30	10
$\rho_{р}, \%$	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10
$i$	Коэффициенты использования, %																			
0,5	20	20	16	13	19	19	14	11	28	27	20	13	25	25	18	13	27	26	17	12
0,6	26	25	20	17	23	22	18	15	33	32	22	17	31	29	22	17	31	30	21	16
0,7	30	29	24	21	26	25	21	18	38	36	27	20	36	34	26	20	36	34	25	20
0,8	34	31	27	24	29	27	23	20	42	40	30	23	39	36	28	23	39	37	28	22
0,9	37	34	30	26	32	30	25	22	47	44	34	26	43	40	31	25	43	40	32	25
1,0	40	36	32	29	34	32	27	24	51	47	37	29	46	43	34	28	47	43	34	8
1,1	42	38	34	31	36	34	28	26	54	50	39	31	49	45	36	30	50	46	37	30
1,25	44	40	36	33	38	36	30	28	57	53	42	34	51	47	38	32	52	48	39	32
1,5	48	44	40	37	42	38	32	30	63	57	47	38	56	51	42	35	58	52	44	36
1,75	50	46	42	39	45	41	34	32	67	61	50	42	60	54	45	38	61	56	47	40
2	52	48	44	41	47	42	36	34	70	63	53	44	62	56	47	40	64	58	49	42
2,25	54	49	46	43	49	44	37	35	73	66	55	47	65	58	49	42	67	60	51	44
2,5	56	50	47	45	50	45	39	36	76	68	57	49	67	60	51	44	69	63	53	47
3	58	52	49	47	53	47	40	38	80	71	60	52	70	63	53	46	73	65	56	50
3,5	60	53	50	48	54	48	41	39	82	73	62	54	72	64	54	48	75	67	58	52
4	61	54	51	49	56	49	42	40	85	75	64	56	74	66	56	49	78	69	60	54
5	64	56	53	52	59	51	44	42	90	79	69	61	78	68	59	52	82	72	64	58

Продолжение табл. 65

Тип светильника	Светильники группы 12				Светильники группы 13				ШОД				ЛПО02-4Х40				ЛПР			
	$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$		$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$		$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$		$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$		$\rho_{п}, \%$	$\rho_{с}, \%$	$\rho_{р}, \%$	
	70	70	50	50	70	70	50	50	70	70	50	50	70	70	50	50	70	70	50	50
	50	50	50	30	50	50	50	30	50	50	50	30	50	50	50	30	50	50	50	30
	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10
<i>i</i>	Коэффициенты использования, %																			
0,5	21	19	19	16	24	22	18	16	23	22	16	14	26	23	24	19	24	23	22	19
0,6	24	23	22	1В	25	24	23	19	29	28	21	18	30	28	26	22	31	29	26	22
0,7	28	26	25	21	29	27	26	23	33	32	24	21	34	32	30	26	35	33	30	26
0,8	30	28	27	24	32	30	29	25	37	35	27	24	37	34	33	29	39	36	33	29
0,9	33	30	30	26	35	32	31	28	40	38	30	27	40	37	35	32	42	39	36	31
1,0	35	32	32	28	37	34	33	30	43	41	32	29	43	39	38	34	45	41	38	34
1,1	37	34	33	30	39	36	35	32	46	43	34	31	45	41	39	36	47	43	40	36
1,25	39	36	35	32	41	38	37	34	49	46	37	34	47	43	41	38	50	45	42	38
1,5	42	38	38	35	44	40	40	37	54	50	40	37	51	46	44	41	53	49	44	41
1,75	45	41	40	37	47	43	42	39	57	53	43	40	53	48	46	44	56	51	47	44
2	46	42	41	39	49	44	43	41	60	55	45	42	55	50	48	45	59	53	48	46
2,25	48	44	42	40	51	46	45	42	63	57	47	44	57	52	50	47	61	55	50	47
2,5	50	45	44	41	52	47	46	44	65	59	48	45	59	53	51	48	63	56	52	49
3	52	46	45	43	54	49	48	45	68	61	50	48	61	55	52	50	65	58	53	51
3,5	53	47	46	44	56	50	48	46	71	63	52	50	63	56	53	51	67	60	54	52
4	54	48	47	45	57	51	49	48	73	65	54	52	64	57	54	52	69	61	55	53
5	57	50	49	47	60	53	51	50	76	67	56	53	67	59	56	55	72	63	58	56

Окончание табл. 65

Тип светильника	ОЛСЗ				ЛВО01/П-01				ЛСП01-2Х150-15				УВЛН6; УВЛВ6			
$\rho_{п}, \%$	70	70	50	50	70	70	50	50	70	70	50	50	70	70	50	50
$\rho_{с}, \%$	50	50	50	30	50	50	50	30	50	50	50	30	50	50	50	30
$\rho_{р}, \%$	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10	10
$i$	Коэффициенты использования, %															
0,5	24	20	17	13	15	13	13	10	27	25	23	22	28	26	25	21
0,6	26	25	22	17	18	17	16	13	33	31	29	26	32	31	29	25
0,7	30	28	24	20	20	19	18	15	38	35	33	30	37	34	34	30
0,8	33	31	27	22	22	21	19	17	41	38	36	32	40	37	36	32
0,9	36	34	30	25	24	23	21	18	44	41	38	35	43	40	39	35
1,0	39	36	32	27	26	24	22	20	47	43	40	37	46	42	42	38
1,1	41	38	34	29	28	25	24	21	49	45	42	39	48	44	43	40
1,25	44	40	36	31	29	27	25	23	51	47	44	41	51	46	45	42
1,5	48	44	39	35	32	29	27	25	55	50	46	44	54	49	48	46
1,75	51	47	42	38	33	30	28	26	57	52	49	47	57	52	51	48
2	54	48	43	40	35	31	29	28	59	54	50	48	59	54	52	50
2,25	56	51	45	41	36	32	30	29	61	56	52	50	61	55	54	52
2,5	58	52	47	43	37	34	31	30	63	57	53	51	63	57	55	53
3	61	55	49	45	39	35	32	31	65	59	54	52	65	58	57	55
3,5	63	56	50	47	40	35	33	32	67	60	56	54	66	59	58	56
4	65	58	52	49	41	36	34	32	68	61	56	55	68	60	59	57
5	69	61	55	52	43	38	35	34	72	63	58	5,7	71	62	60	59

Таблица 66. Коэффициенты использования светового потока светильников с типовыми кривыми силы света, излучаемого в нижнюю полусферу

Типовая кривая	Равномерная М						Косинусная Д						Глубокая Г								
	70		50		30		70		50		30		70		50		30				
$\rho_{п}, \%$	50	30	50	30	10	50	30	50	30	10	50	30	50	30	50	30	10				
$\rho_{с}, \%$	30	10	30	10	10	30	10	30	10	10	30	10	30	10	30	10	10				
$\rho_{р}, \%$	30	10	30	10	10	30	10	30	10	10	30	10	30	10	30	10	10				
$i$	Коэффициент использования, %																				
0,5	28	28	21	21	25	19	15	36	35	30	30	34	28	25	58	57	55	53	57	5	49
0,6	35	34	27	26	31	24	18	43	42	35	34	40	33	28	68	65	62	60	64	6	57
0,7	44	39	32	31	39	31	25	48	47	41	38	45	38	33	74	69	68	64	69	6	61
0,8	49	46	38	36	43	36	29	54	51	45	43	49	43	37	78	73	72	69	72	6	66
0,9	51	48	40	39	46	39	31	57	55	48	46	52	46	41	81	76	75	72	75	7	70
1,0	54	50	43	41	48	41	34	60	57	52	50	55	49	45	84	78	78	75	77	7	72
1,1	56	52	46	43	50	43	35	64	60	55	52	58	51	47	87	81	80	77	79	7	74
1,25	59	55	49	46	53	45	38	69	63	60	56	61	55	50	90	83	84	79	82	7	76
1,5	64	59	53	50	56	49	42	75	69	67	62	67	61	55	94	86	88	83	85	8	79
1,75	68	62	57	53	60	53	45	79	72	71	66	70	65	60	97	88	92	85	86	8	82
2,0	73	65	61	56	63	56	48	83	75	75	69	73	68	64	99	90	95	88	88	8	84
2,25	76	68	65	60	66	59	51	86	77	79	73	76	71	66	101	92	97	90	90	8	85
2,5	79	70	68	63	68	61	54	89	80	82	75	78	73	69	103	93	99	91	91	8	87
3,0	83	75	73	67	72	65	58	93	83	86	79	81	77	73	105	94	102	92	93	9	89
3,5	87	78	77	70	75	68	61	96	86	90	82	83	80	76	107	95	104	94	94	9	90
4,0	91	80	81	73	78	72	65	99	88	93	84	85	83	79	109	96	105	94	94	9	91
5,0	95	83	86	77	80	75	69	105	90	98	88	88	85	81	111	97	108	96	96	9	92

**Расчет.** При минимальном объекте различения 0,7 мм характер зрительных работ соответствует IV разряду, средней точности (см. табл. 83 подразд. 5.7). Значения коэффициентов отражения объекта  $\rho_o = 55\%$  и фона  $\rho_\phi = 40\%$  приведены в табл. 84 подразд. 5.7. Следовательно, контраст объекта с фоном будет равен  $K = \frac{50-40}{40} = 0,37$ .

В этом случае фон классифицируется как средний ( $0,4 > \rho_\phi > 0,2$ ), контраст – средний ( $0,5 > K > 0,2$ ), что соответствует подразряду зрительных работ «в», и норма освещенности для общего освещения  $E = 200$  лк (см. табл. 83 подразд. 5.7).

Для общего равномерного освещения при нормальных условиях работы могут быть использованы светильники ЛСПО2 с двумя лампами типа ЛБ мощностью 40 Вт. Светильники ЛСПО2 с диффузионным отражателем имеют кривую силы света типа Д (косинусная). В данном случае при выборе светильников использовались данные табл. 92 подразд. 5.7, более обширные и разнообразные данные о типах светильников, ламп, их светотехнические характеристики представлены в каталогах и справочной литературе [28].

Светильники предлагается крепить на штангах, высота свеса  $h_c = 0,5$  м, высота рабочей поверхности над полом 1 м, т. е. расчетная высота подвеса  $h = 3,5 - 0,5 - 1 = 2$  м (см. рис. 49). Выбранный светильник имеет кривую распределения силы света типа Д, для которой по табл. 61 оптимальное соотношение  $\lambda_c = 1,4$ .

Расстояние между соседними светильниками будет равно  $L = 2 - 1,4 = 2,8$  м, а расстояние от крайнего ряда до стены  $l = 2,8 \cdot 0,4 = 1,12 \approx 1,1$  м. Для освещения помещения светильники располагают в два ряда  $N = 2$ , расстояние между рядами 2,8 м, от стены – 1,1 м.

Значения коэффициентов отражения потолка  $\rho_\pi = 50\%$ , стен  $\rho_c = 30\%$ , рабочей поверхности пола  $\rho_p = 10\%$  определяются в соответствии с рекомендациями табл. 64.

$$\text{Индекс помещения } i = \frac{5 \cdot 7,5}{2(5+7,5)} = 1,5.$$

С учетом  $\rho_\pi$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_p$ ,  $i$  и типа светильника коэффициент использования светового потока  $\eta = 0,61$  (табл. 91 подразд. 5.7).

В соответствии с таблицей светильник имеет четвертую эксплуатационную группу и коэффициент запаса  $K_3 = 1,5$  (см. табл. 85 подразд. 5.7) при условии чистки светильников не реже 4 раз в год. Коэффициент неравномерности освещения  $Z = 1,1$  для люминесцентных ламп.

Таким образом, световой поток одного ряда освещения будет равен  $\Phi = \frac{200 \cdot 5 \cdot 7,5 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2 \cdot 0,49} = 12627$  лм.

Поскольку люминесцентная лампа ЛБ-40 имеет номинальный световой поток  $\Phi_{\text{ном}} = 3120$  лм (табл. 88 подразд. 5.7) и в каждом светильнике устанавливаются по две лампы, то в одном ряду количество светильников  $N_1$  будет равно  $N_1 = \frac{12627}{2 \cdot 3120} = 2$  шт.

Поскольку рекомендуется  $\frac{L_A}{L_B} < 1,5$ , принимаем  $\frac{L_A}{L_B} = 1,4$ , тогда  $L_B = \frac{2,8}{1,4} = 2$  м.

При длине светильника с лампами 1537 мм (см. табл. 92 подразд. 5.7) и расстоянии между ними 2 м они располагаются по длине помещения.

Таким образом, для освещения помещения размерами  $5 \times 7,5$  м потребуется установить четыре светильника с двумя лампами в каждом светильнике, световой поток системы освещения не превышает 10 – 20 % расчетного значения и обеспечивает нормативную освещенность 200 лк.

#### ***5.4.4. Расчет освещения точечным методом***

В методике расчета освещенности точечным методом будут рассматриваться особенности определения суммарного потока ламп. Вопросы выбора источников и светильников, их расположение и установка рассмотрены при расчете освещенности методом коэффициента использования светового потока.

Приведем две методики расчета:

- для круглосимметричных точечных излучателей (например, при использовании ламп накаливания);
- для светящихся линий (при использовании люминесцентных ламп, когда светильники размещаются в виде длинных линий).

**Круглосимметричные точечные излучатели.** Первоначально принимается, что световой поток условной лампы равен 1000 лм. Создаваемая в этом случае освещенность называется **условной освещенностью  $e$** .

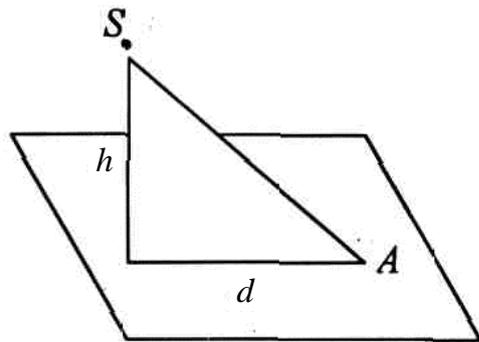


Рис. 50. Схема расположения светильников над рабочим местом

Величина условной освещенности  $e$  зависит от светотехнических характеристик светильника и геометрических размеров  $h$  и  $d$  (рис. 50). На рис. 50  $S$  – источник света;  $A$  – контрольная точка;  $d$  – проекция расстояния от источника света до контрольной точки на освещаемую поверхность;  $h$  – высота подвеса. Для определения  $e$  служат пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности (рис. 51).

**Изолюксы** – это кривые, являющиеся геометрическим местом точек равной освещенности.

Световой поток в точечном методе расчета вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{1000EK_3}{\mu \sum e_i}, \quad (301)$$

где  $E$  – нормативная освещенность (см. табл. 83 подразд. 5.7);

$K_3$  – коэффициент запаса (см. табл. 85 подразд. 5.7);

$e$  – условная освещенность от  $i$ -го источника;

$n$  – количество источников;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий отраженный свет, характер светораспределения, тщательность учета удаленных источников, и принимается обычно в пределах 1,1 – 1,2.

В качестве контрольных точек для расчета освещенности выбирают точки, где  $\sum e_i$  имеет наименьшее значение. Характерные контрольные точки для системы общего равномерного освещения показаны на рис. 52 для различных вариантов размещения источников.

В принципе, не следует выискивать точки с абсолютным минимумом освещенности (у стен, в углах). Если в таких местах расположены рабочие места, то задача обеспечения нормативной освещенности может быть решена путем увеличения мощности ближайших светильников или установкой дополнительных источников.

Контрольные точки для локализованного освещения также выбираются там, где наихудшая освещенность в пределах поверхности, на которой должна быть обеспечена регламентируемая освещенность  $E$ .

На рис. 52 источники, для которых находят значения условной освещенности  $e_i$ , соединены с контрольными точками (А и Б) линиями.

Обычно учитывают светильники на расстояниях в пределах трех наименьших  $d$  от контрольной точки. Также следует иметь в виду, что чем меньше отношение  $E/h$ , тем большую роль начинают играть удаленные светильники, и их необходимо учитывать при определении  $\sum e_i$ .

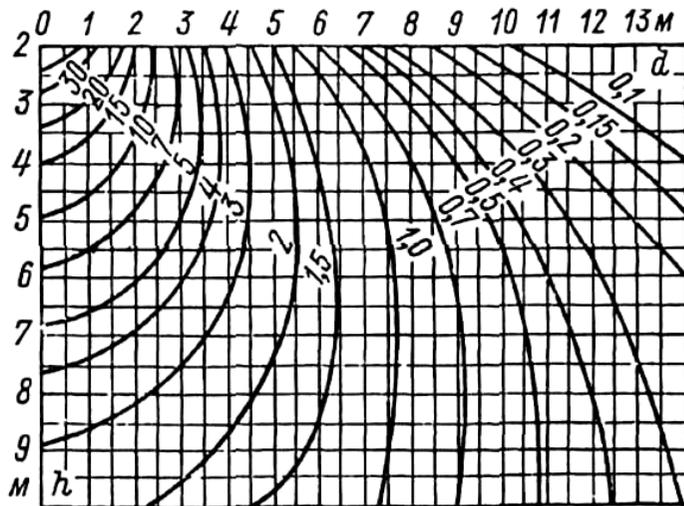
Не должны учитываться светильники, которые реально не влияют на освещенность в контрольной точке из-за затенения оборудованием или самим работающим при его фиксированном положении на рабочем месте.

#### ***5.4.5. Пример расчета освещения точечным методом***

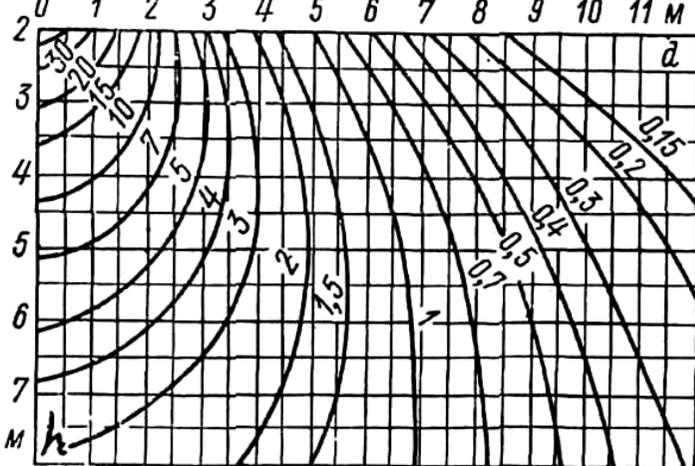
В помещении, размеры которого и расположение светильников показаны на рис. 53, требуется обеспечить освещенность  $E = 200$  лк при  $K_z = 1,3$ . Светильники УП-24 подвешены на высоте 3 м.

**Расчет:** расстояния  $d$  могут быть рассчитаны с учетом указанных размеров. Для контрольной точки А расстояния до светильников 1, 2, 4, 5 равны между собой и составляют  $d_1 = d_2 = d_4 = d_5 = \sqrt{1^2 + 0,75^2} = 1,25$  м, расстояния до светильников 3, 6  $d_3 = d_6 = \sqrt{2,25^2 + 1^2} = 2,46$  м.

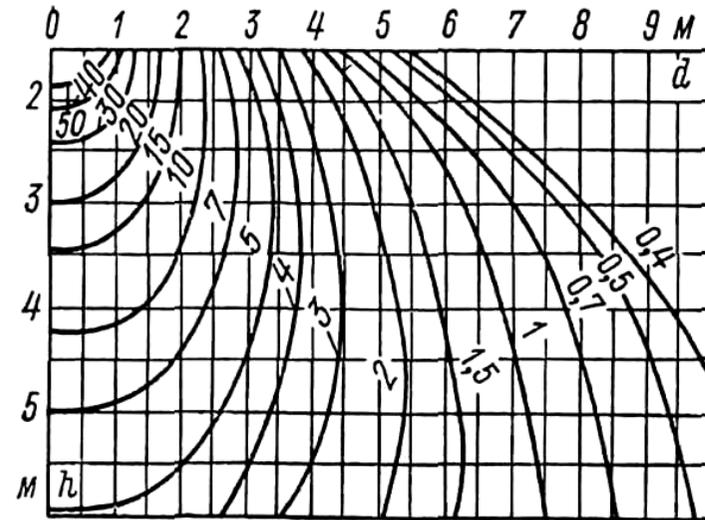
Значение  $e$  определяем по пространственным изолюксам условной горизонтальной освещенности, изображенным на рис. 51. Результаты расчетов представлены в табл. 67.



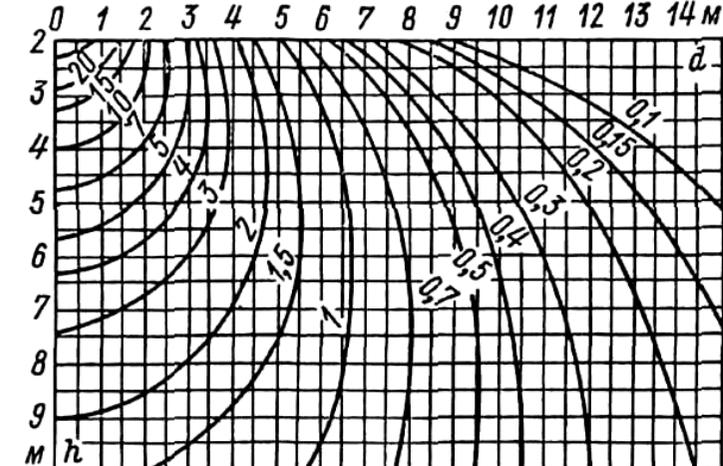
Светильники У, УМП15, УП-24, «Астра-1», 11, 12



Светильник У15

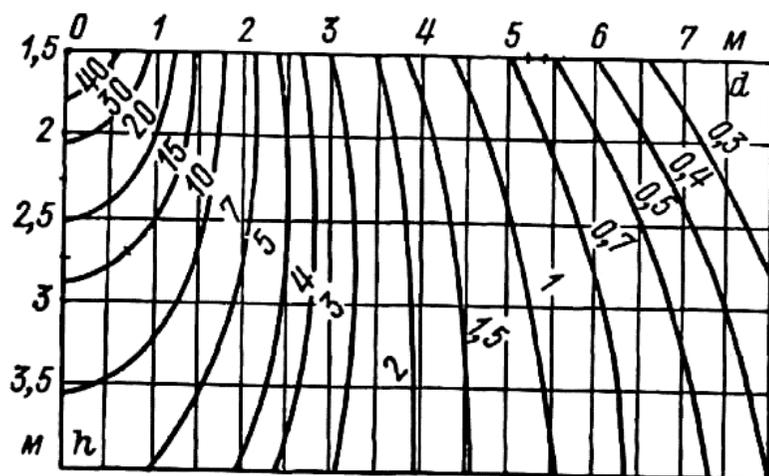


Светильники ППД100, ППД200

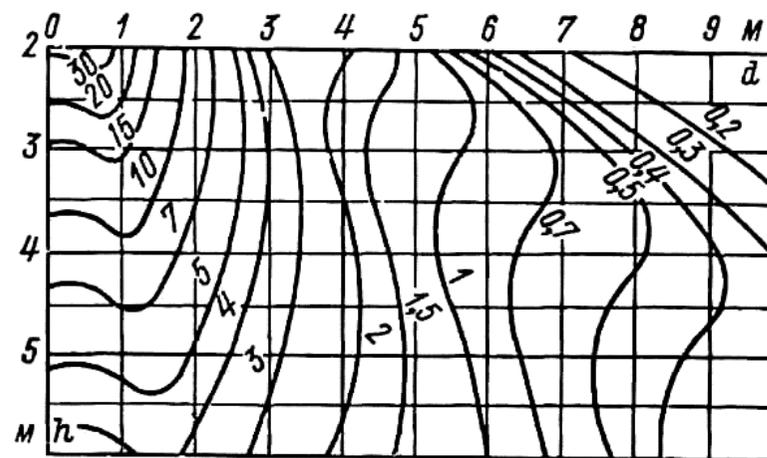


Светильник ППД500

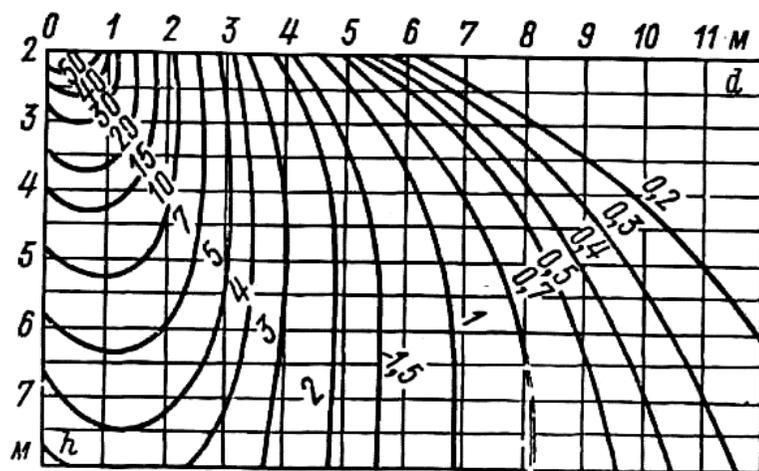
Рис. 51. Пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности (продолжение и окончание см. на с. 250, 251, 252, 253)



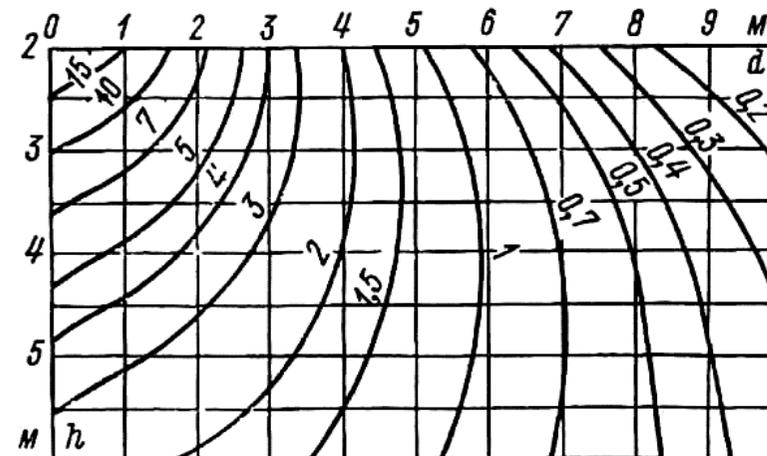
Светильник НПП01



Светильник ВЗГ-200АМ с отражателем

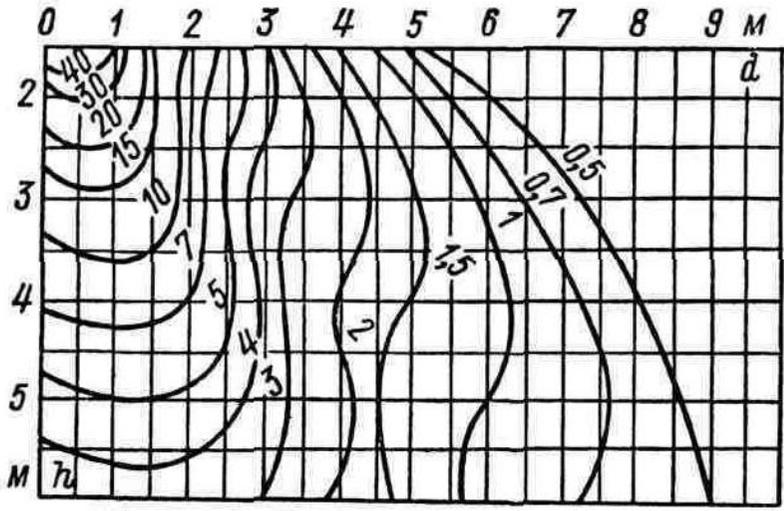


Светильник Н4Б-300М с отражателем

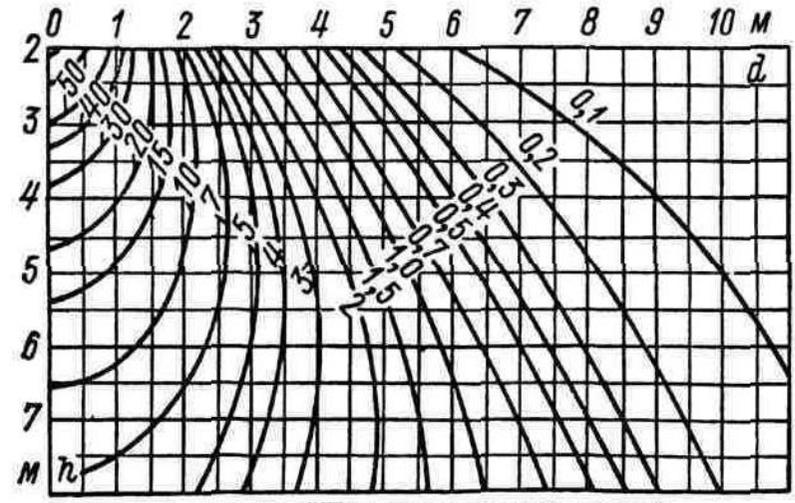


Светильник ВЗГ-100М

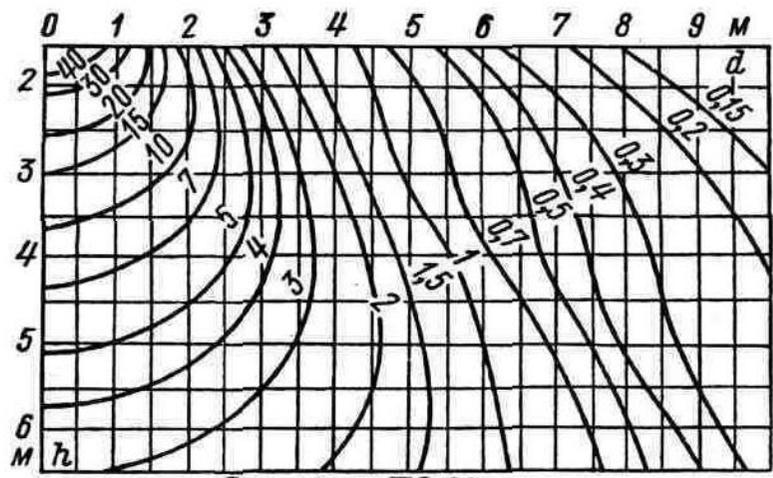
Рис. 51. Продолжение (начало см. на с. 249, окончание – на с. 253)



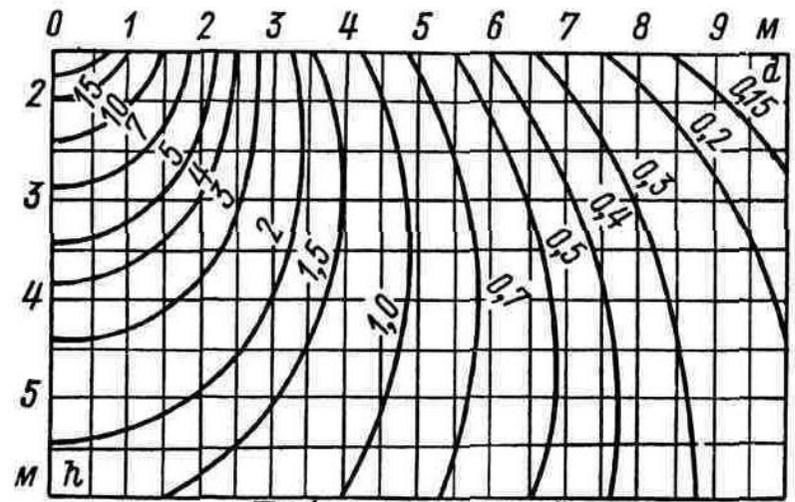
Светильник ВЗГ/В4А-200М с отражателем



Светильник НВ-1 с зеркальной лампой

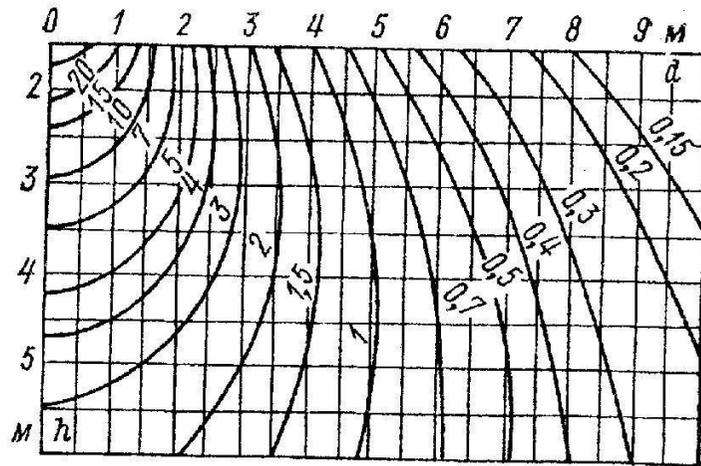


Светильник ПО-21

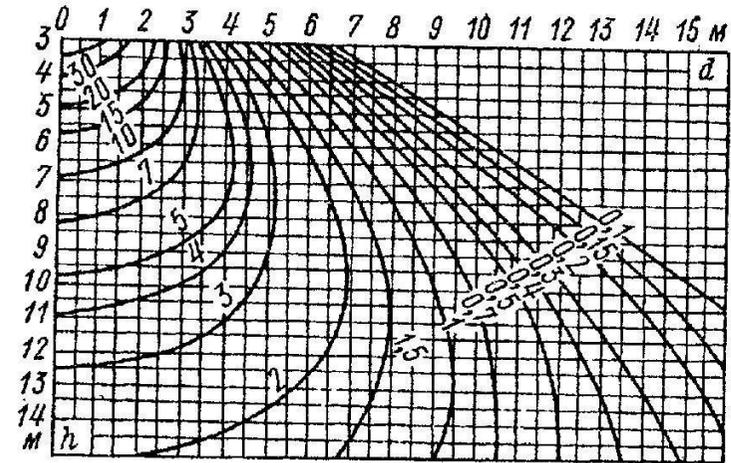


Плафон одноламповый

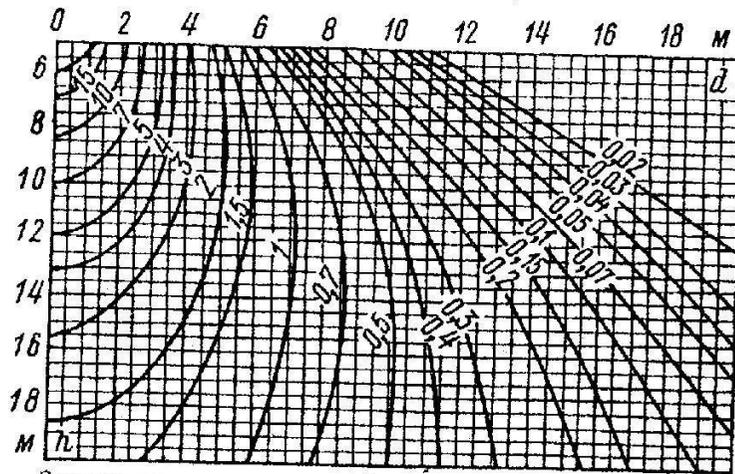
Рис. 51. Продолжение (начало см. на с. 249, окончание – на с. 253)



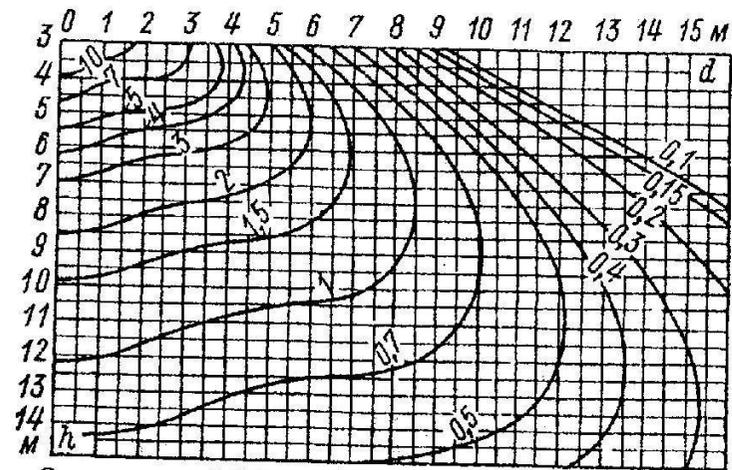
Плафон двухламповый



Светильники РСП08/Г03, РСП08/Г5'3

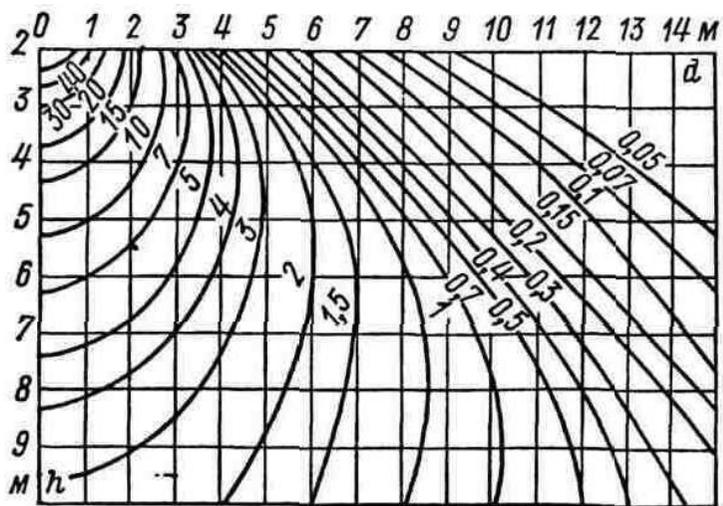


Зеркальная лампа с кривой силы света типа Г

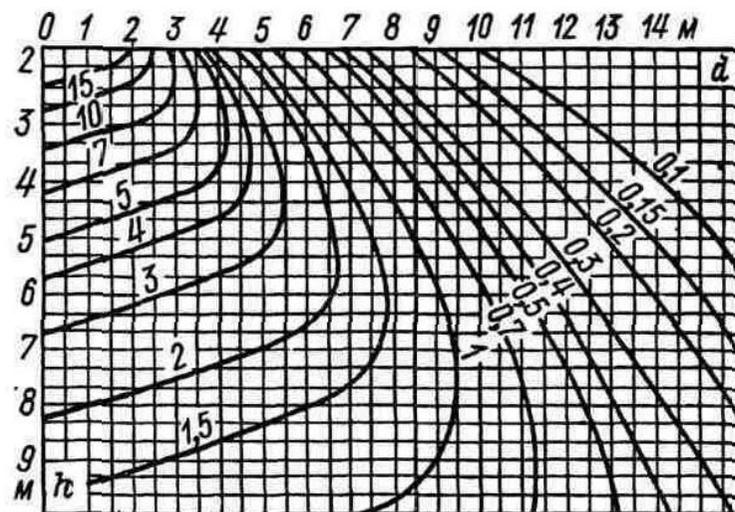


Светильники РСП07, РСП08/Л00, РСП08/Л5'0

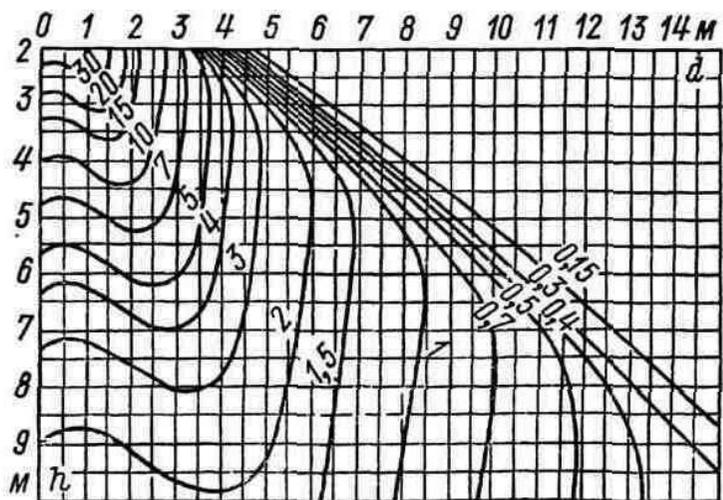
Рис. 51. Продолжение (начало см. на с. 249, окончание – на с. 253)



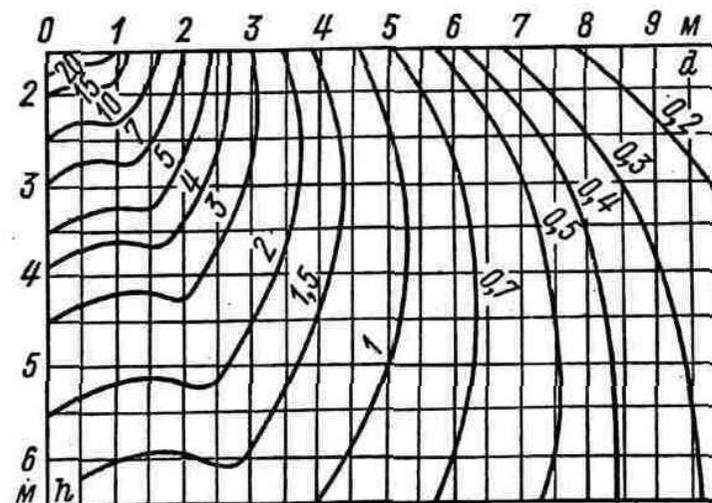
Светильник УПД



Светильники С, СУ



Светильник НСП07



Светильник НСП02, НСП03

Рис. 51. Окончание (начало см. на с. 249)

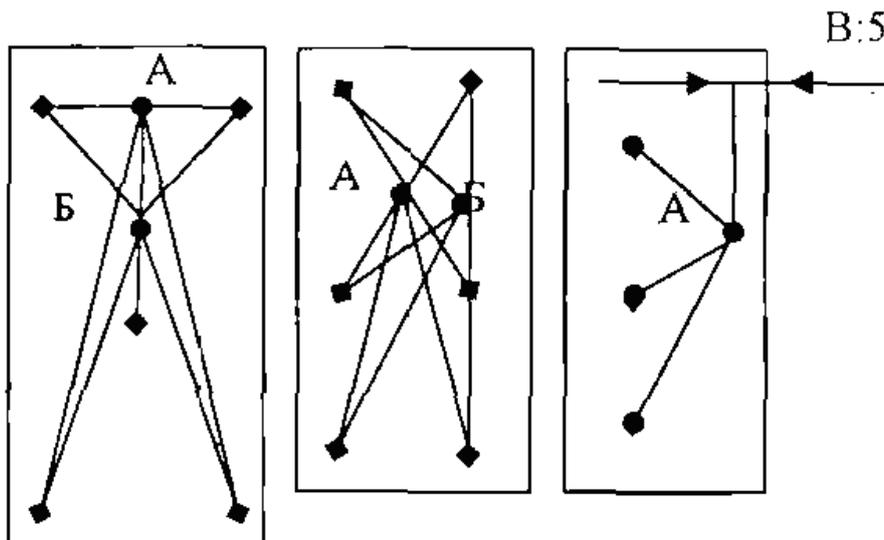


Рис. 52. Выбор контрольных точек для расчета освещенности при различном расположении светильников

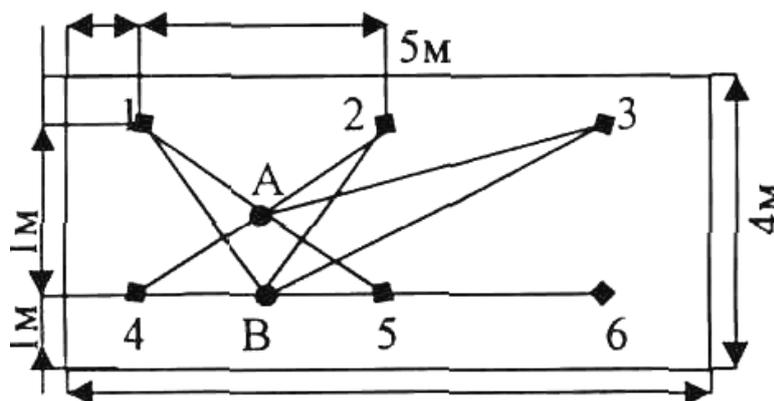


Рис. 53. Размещение светильников в помещении и выбор контрольных точек при расчете освещенности

Наихудшей является точка В, по освещенности которой определяют необходимый поток, принимая  $\mu = 1,1$ .

$$\Phi = \frac{1000 \cdot 200 \cdot 1,3}{1,1 \cdot 79} = 2990 \text{ лм.} \quad (302)$$

По табл. 89 подразд. 5.7 выбираем лампу 200 Вт. Она обеспечит нормативную освещенность 200 лк, световой поток лампы равен 2920 лм, что не выходит за допустимые пределы отклонения номинального потока от расчетного. Допускается  $\Phi_n = -10 \dots 20 \%$ .

*Таблица 67. Результаты расчета условной освещенности  
в контрольных точках*

Точка	Номер светильника	Расстояние $d$ , м	Условная освещенность $e_i$ светильников	$\sum e_i$ , лк
А	1, 2, 4, 5	1,25	$18,5 \cdot 4 = 74$	92
	3,6	2,46	$9 \cdot 2 = 18$	
В	4,5	0,75	$22 \cdot 2 = 44$	79
	6	2,25	$10 \cdot 1 = 10$	
	1,2	2,13	$9 \cdot 2 = 18$	
	3	3,01	$7 \cdot 1 = 7$	

#### **5.4.6. Светящиеся линии**

Излучатели, длина которых  $L$  превышает половину расчетной высоты подвеса  $h$  ( $L > 0,5h$ ), рассматриваются как светящиеся линии. Плотность потока при суммарном потоке ламп в линии  $\Phi$  определяется как

$$\Phi' = \frac{\Phi}{L'} \quad (303)$$

причем линия с равномерно распределенными по их длине разрывами  $d$  рассматривается как непрерывная, если  $d < 0,5h$  и под  $L$  понимается габаритная длина линии. Для протяженных линий с такими же разрывами можно рассчитывать плотность светового потока

$$\Phi = \frac{\Phi}{d + 1'} \quad (304)$$

где  $\Phi$  – поток ламп в сплошном элементе линии длиной  $l$  (под сплошным элементом может пониматься длина светильника).

При  $d > 0,5h$  плотность потока  $\Phi'$  определяется для каждого сплошного участка линии отдельно.

**Выбор контрольных точек.** При общем равномерном освещении контрольные точки выбирают посередине между рядами светиль-

ников (рис. 54, а, б). При большой длине рядов  $L > 0,2h$  сильно сказывается уменьшение освещенности у концов линии (в два раза по сравнению с центром).

Для компенсации уменьшения освещенности рекомендуется продлить линию на  $0,5h$  с тем, чтобы у границ освещаемой поверхности увеличить плотность светового потока вдвое; второй вариант – установить дополнительно поперечные светильники. После принятия одной из этих мер контрольную точку можно выбирать посередине продольного ряда (рис. 54, а).

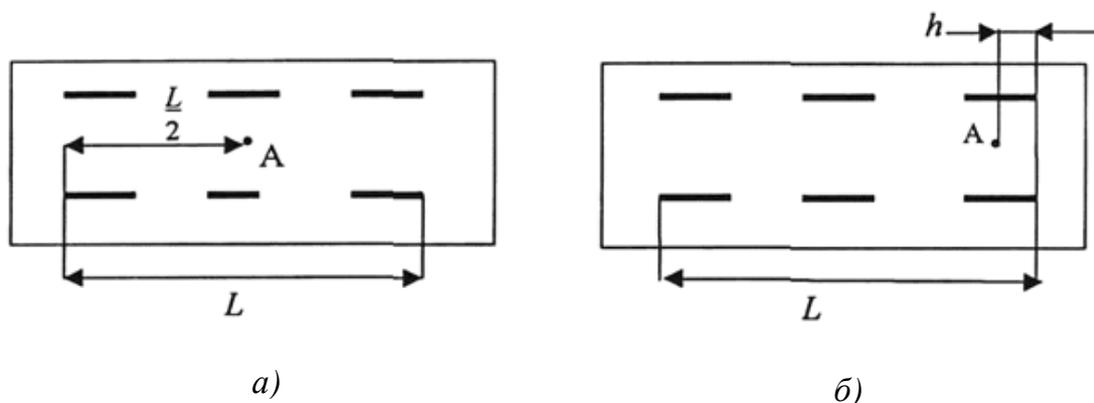


Рис. 54. Выбор контрольных точек при общем равномерном освещении

Если компенсация плотности светового потока не предусмотрена, поскольку рабочие места у конца продольной линии отсутствуют, то контрольную точку выбирают на расстоянии  $h$  от последнего светильника ряда (рис. 54, б).

**Определение относительной освещенности.** Относительная освещенность  $\varepsilon$  – это освещенность при плотности светового потока  $\Phi' = 1000$  лм/м и высоте  $h = 1$  м.

Для определения  $\varepsilon$  используют графики линейных изолюкс (рис. 56). При использовании этих графиков  $\varepsilon = f(p', L')$  определяют размеры  $p$  и  $L$  (рис. 55), где  $h$  – высота расположения светильника над освещаемой рабочей поверхностью;  $L$  – длина излучателей;  $p$  – проекция расстояния от края излучателя до контрольной точки  $A$ . Находят отношения  $p' = p/h$  и  $L' = L/h$ .

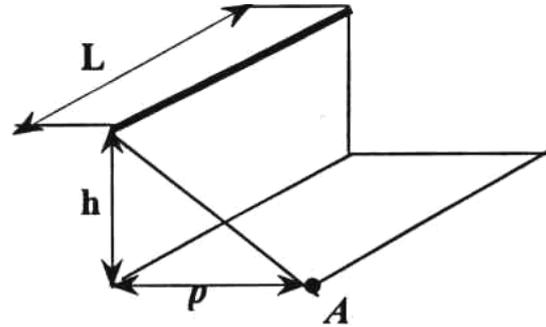


Рис. 55. Схема расположения светильника относительно контрольной точки при определении относительной освещенности

По координатам  $p'$  и  $L'$  на графиках  $\varepsilon = f(p', L')$  определяют освещенность точек  $\varepsilon$ , непосредственно лежащих против конца линии. Линии, для которых  $L' > 4$ , при расчетах рассматриваются как неограниченно длинные.

Суммируя значения  $\varepsilon$  от ближайших рядов или полурядов (часть ряда), освещающих точку, получают  $\sum \varepsilon$  (рис. 57, а).

Если контрольная точка не лежит против конца линии (рис. 57, б), то линию дополняют воображаемым отрезком, освещенность от которого затем вычитается.

Плотность потока  $\Phi'$  рассчитывается по формуле

$$\Phi = \frac{1000EK_3h}{\mu \sum \varepsilon}, \quad (305)$$

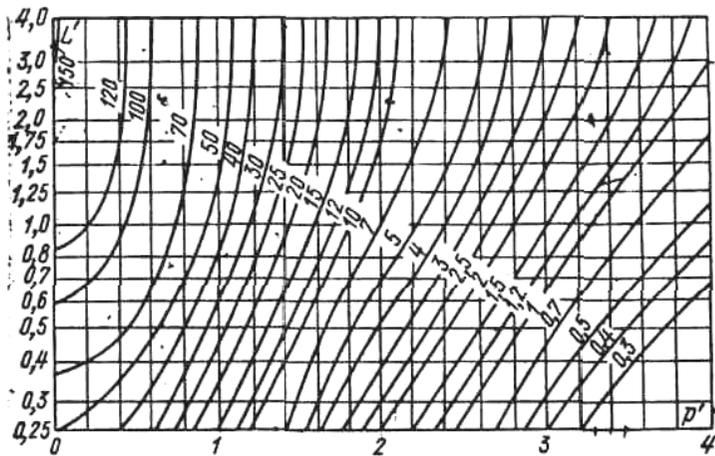
где  $E$  – требуемая освещенность, лк;

$K_3$  – коэффициент запаса;

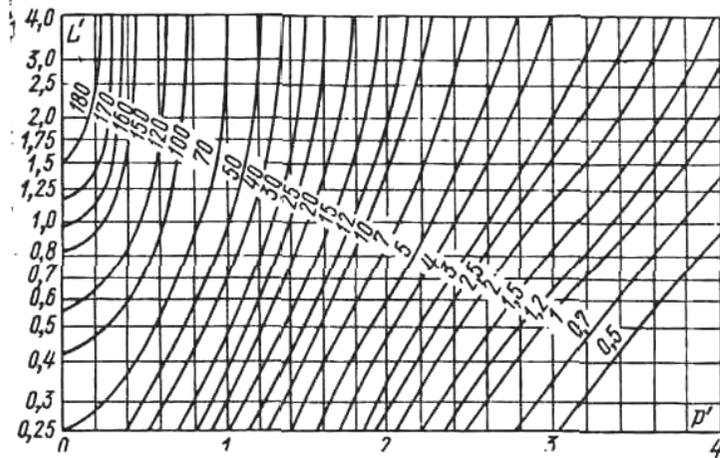
$h$  – высота светильника над освещаемой поверхностью, м;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий отраженный свет, характер светораспределения, тщательность учета удаленных источников принимается в пределах 1,1 – 1,2;

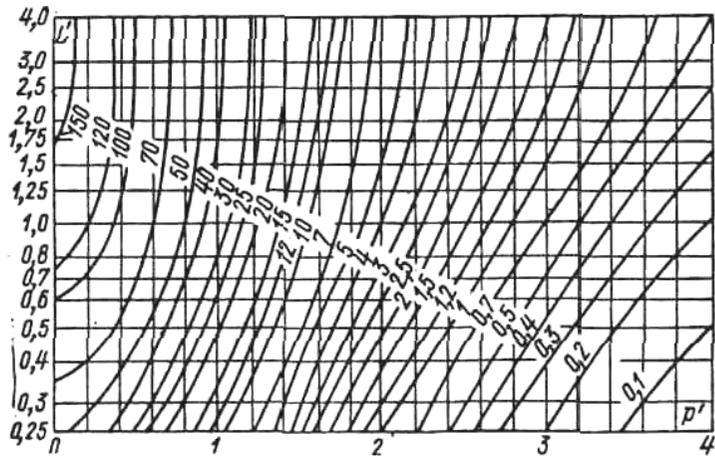
$\sum \varepsilon$  – суммарная относительная освещенность, лк.



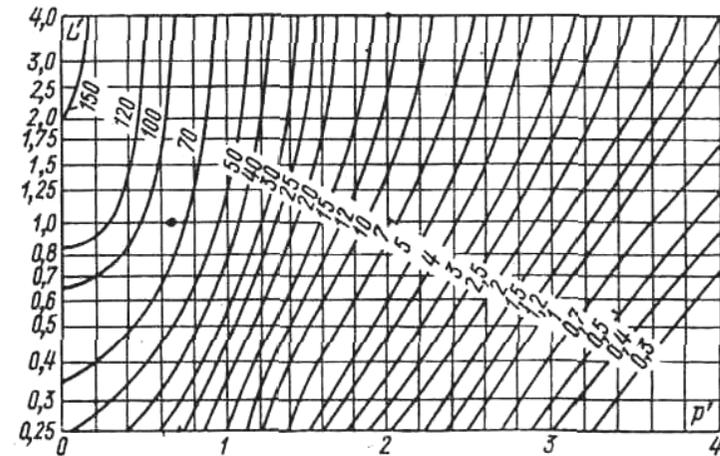
Светильники группы 4



Светильники группы 1



Светильники ЛОУ1ПЗ-2 X 40/1011



Светильники группы 2

Рис. 56. Линейные изолуксы относительной освещенности (продолжение и окончание см. на с. 259, 260, 261, 262)

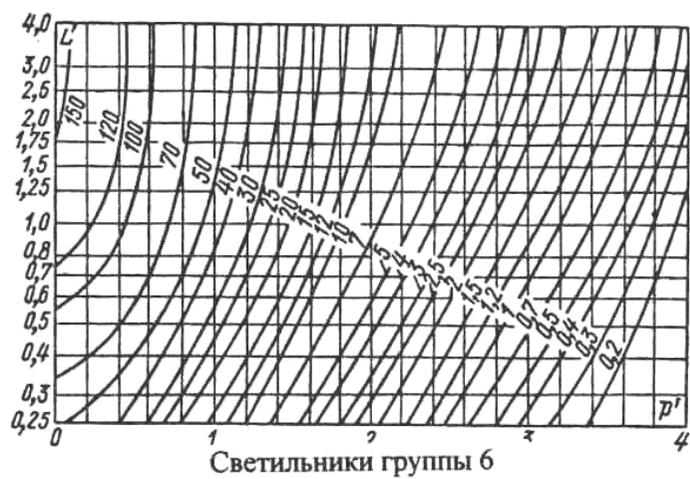


Рис. 56. Продолжение (начало см. на с. 258, окончание – на с. 262)

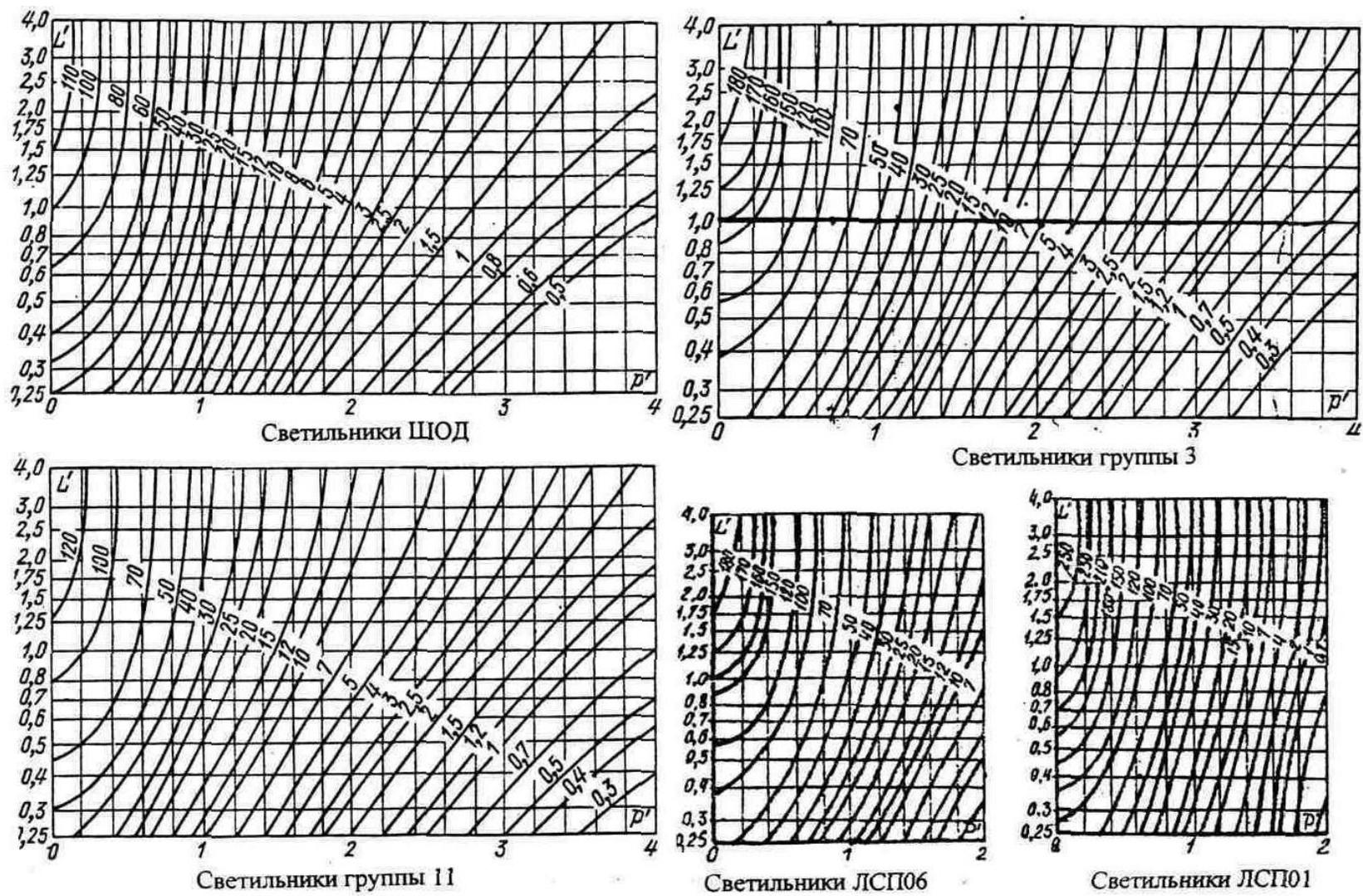
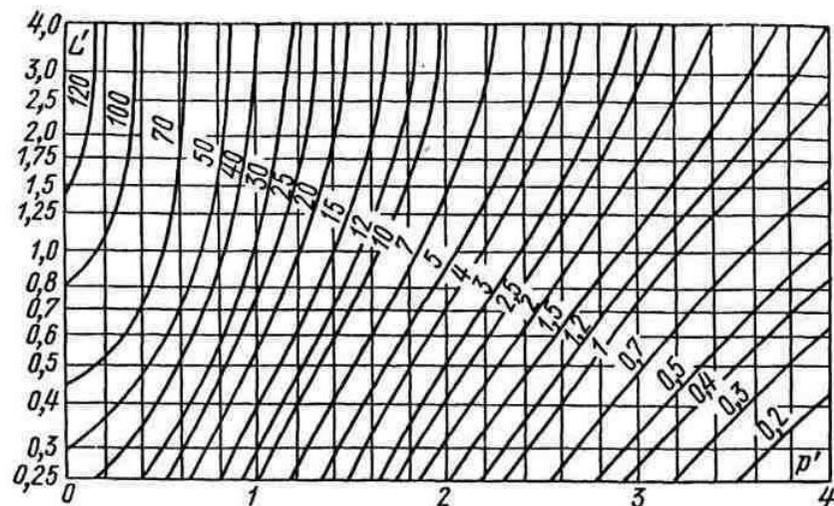
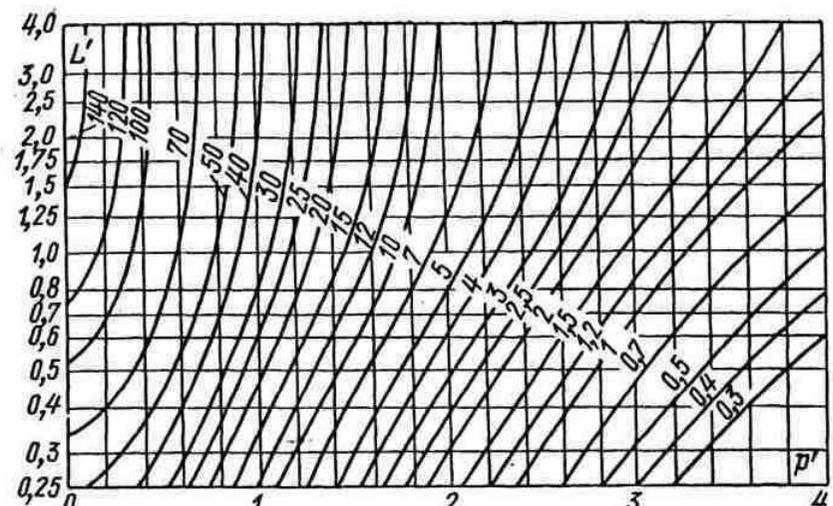


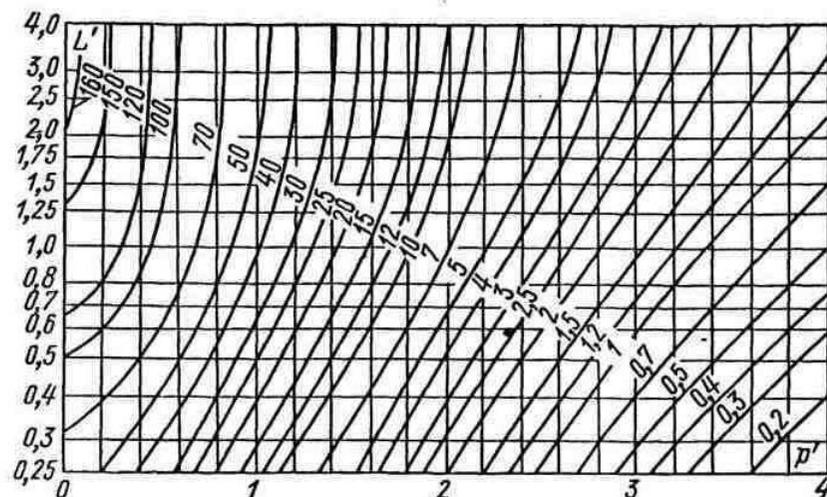
Рис. 56. Продолжение (начало см. на с. 258, окончание – на с. 262)



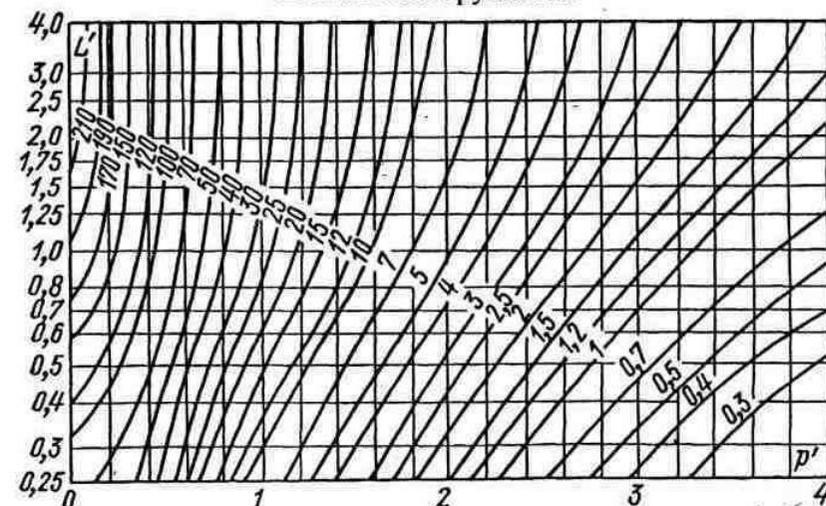
Светильники группы 14



Светильники группы 22

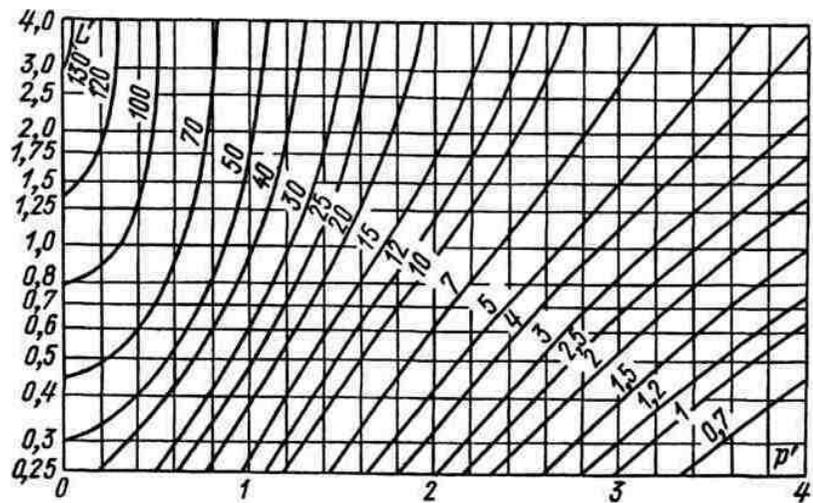


Светильники группы 16

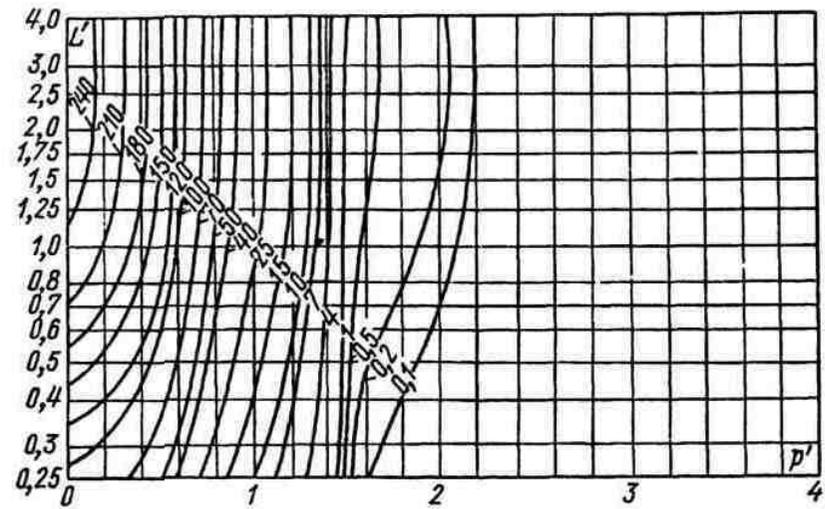


Светильники УВЛН6, УВЛВ6

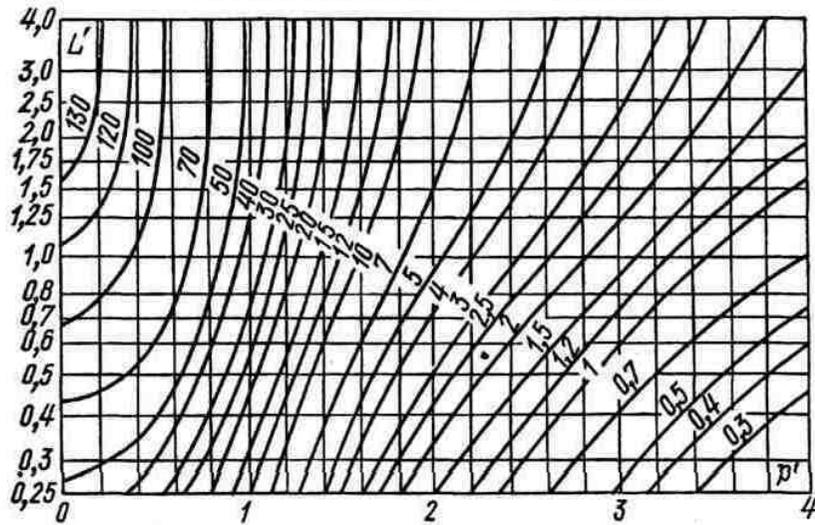
Рис. 56. Продолжение (начало см. на с. 258, окончание – на с. 262)



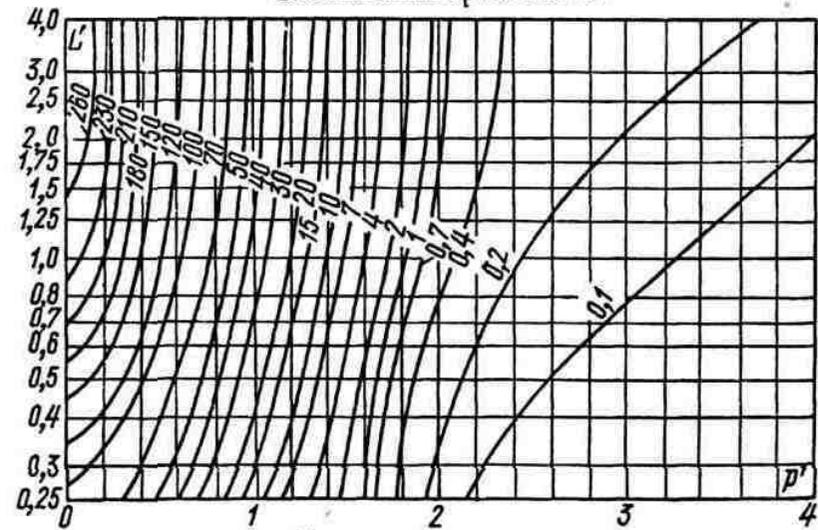
Светильники ПВЛМ с 1 лампой ЛБР



Светильники групп 23. 24



Светильники ПВЛМ-Р с лампами ЛБР



Светильники группы 25

Рис. 56. Окончание (начало см. на с. 258)

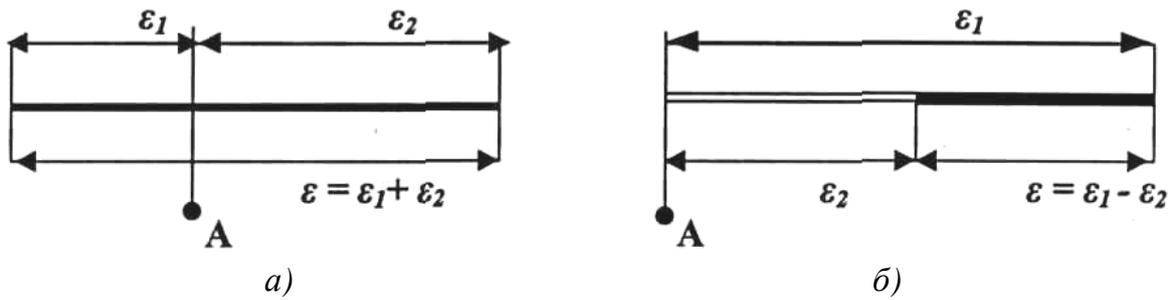


Рис. 57. Значение относительной освещенности при различных положениях контрольных точек

Компоновка линии может проходить по двум направлениям:

- находят общий поток ламп в линии как  $\Phi = \Phi' \cdot L$ .
- если линия протяженная с разрывами длиной  $d$ , то  $\Phi = \Phi' - (l + d)$ , где  $l$  – длина светильника.

По значениям  $\Phi$  выбор подходящего варианта осуществляют как и в методе коэффициента использования светового потока.

**Определение относительной освещенности по известному светораспределению.** При отсутствии для выбранного светильника линейных изолюкс используют светотехнические характеристики светильников, приведенные в табл. 69. В этом случае, определив как обычно  $p'$  и  $L'$ , находят значения вспомогательной функции  $f(p', L')$  и  $\alpha$  по табл. 68, а затем по значению  $\alpha$  находят  $I_\alpha$  по табл. 69. Далее относительную освещенность  $\varepsilon$  рассчитывают по формуле

$$\varepsilon = f(p', L') I_\alpha. \quad (306)$$

Таблица 68. Значение вспомогательной функции  $f(p', L')$  и  $\alpha$

$\alpha$ , град	0	5	15	25	35	45	50	55	60	65	70	75
$p'$	0	0,09	0,27	0,47	0,7	1,0	1,19	1,43	1,73	2,14	2,75	3,73
$L'$	Значения $f(p', L')$											
0,25	0,24	0,235	0,218	0,187	0,138	0,088	0,070	0,049	0,032	0,0195	0,010	0,0044
0,5	0,43	0,314	0,376	0,330	0,250	0,165	0,125	0,090	0,062	0,037	0,020	0,0088
1,0	0,62	0,605	0,570	0,490	0,385	0,267	0,208	0,055	0,107	0,068	0,037	0,0165
1,5	0,68	0,670	0,630	0,550	0,450	0,315	0,250	0,095	0,140	0,090	0,0505	0,024
2,0	0,702	0,690	0,650	0,565	0,465	0,337	0,270	0,215	0,160	0,105	0,062	0,0295
3,0	0,714	0,700	0,660	0,580	0,475	0,352	0,290	0,228	0,170	0,117	0,072	0,038
4,0	0,717	0,705	0,670	0,586	0,487	0,356	0,295	0,232	0,180	0,125	0,078	0,042
$\infty$	0,725	0,715	0,680	0,590	0,490	0,363	0,300	0,024	0,185	0,132	0,085	0,049

Таблица 69. Светотехнические характеристики светильников с люминесцентными лампами

$\alpha$ , град	Сила света светильников, кД									
	Светильники группы 1		Светильники группы 2		Светильники группы 3		Светильники группы 4		Светильники группы 5	
	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$
0	256	256	207	207	260	260	210	210	138	138
5	256	257	205	207	259	260	207	207	137	136
15	246	256	199	207	245	256	195	206	130	133
25	229	241	186	202	219	240	175	200	119	130
35	206	221	164	193	187	217	150	188	107	126
45	174	188	138	166	150	180	119	164	91	118
55	135	139	108	124	112	132	86	123	74	108
65	92	92	74	89	72	84	57	82	50	93
75	50	48	1	34	40	34	31	33	26	76
85	12	11	10	14	16	11	13	13	11	62
90	–	–	0	7	1	–	1	5	7	56
95	–	–	6	14	–	–	5	18	6	49
105	–	–	6	41	–	–	9	40	3	41
115	–	–	10	44	–	–	12	45	6	33
125	–	–	15	39	–	–	5	42	–	23
135	–	–	20	42	–	–	19	44	–	18
145	–	–	25	42	–	–	24	44	–	9
155	–	–	28	39	–	–	27	38	–	4
165	–	–	29	37	–	–	28	32	–	–
175	–	–	30	30	–	–	29	29	–	–
180	–	–	30	30	–	–	30	30	–	–
КПД,%	74		82		66		75		65	
$\alpha$ , град	Светильники группы 7		ПВЛМ-2Х40;2Х80 с лампами ЛБР		ПВЛМ-Р с лампами ЛБР		ПВЛМ- 1Х40; 1Х80 с лампами ЛБР			
	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$		
0	130	130	175	175	190	190	174	174		
5	127	134	175	175	188	190	174	174		
15	111	140	165	170	180	190	167	172		
25	91	134	148	170	158	185	155	169		
35	72	108	130	168	125	170	134	160		
45	54	77	110	160	90	137	106	152		
55	39	52	70	145	65	87	80	140		
65	24	35	60	135	60	65	54	128		
75	14	20	30	120	30	50	30	114		
85	8	13	20	80	20	45	10	103		

Продолжение табл. 69

α, град	Сила света светильников, кд									
	Светильники группы 7		ПВЛМ-2Х40;2Х80 с лампами ЛБР		ПВЛМ-Р с лампами ЛБР		ПВЛМ- 1Х40; 1Х80 с лампами ЛБР			
	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$		
90	1	10	0	70	0	47	—	96		
95	8	18	5	70	5	50	—	90		
105	13	30	10	85	20	80	—	84		
115	31	65	15	100	30	82	—	76		
125	50	84	17	78	35	67	—	63		
135	64	53	20	65	42	45	—	47		
145	80	98	30	52	45	38	—	33		
155	91	101	35	52	50	38	—	12		
165	98	103	40	55	55	40	—	—		
175	101	104	42	58	58	42	—	—		
180	103	103	42	42	50	50	—	—		
КПД, %	65		85		74		85			
α, град	Сила света светильников, кд									
	Светильники группы 12		Светильники группы 13		ШОД		ЛПО02-4Х40		ЛПР	
	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$
0	194	194	251	251	172	172	230	230	202	202
5	192	192	246	246	168	170	226	226	179	201
15	181	184	138	237	158	164	219	224	182	210
25	165	172	216	222	132	148	200	220	156	206
35	142	154	185	200	103	134	169	204	124	182
45	106	121	147	160	73	102	114	143	91	132
55	80	95	105	115	40	68	68	86	54	84
65	53	70	71	96	22	48	40	60	32	62
75	31	45	42	52	14	39	23	45	17	58
85	12	24	13	18	5	38	12	33	4	51
90	—	—	—	—	0	38	—	27	0	53
95	—	—	—	—	12	47	—	23	1	60
105	—	—	—	—	34	64	—	20	3	75
115	—	—	—	—	55	78	—	18	5	86
125	—	—	—	—	75	81	—	17	5	87
135	—	—	—	—	91	78	—	14	6	72
145	—	—	—	—	106	84	—	11	1	50
155	—	—	—	—	118	102	—	6	—	29
165	—	—	—	—	125	125	—	—	—	12
175	—	—	—	—	129	131	—	—	—	5
180	—	—	—	—	130	130	—	—	—	5
КПД, %	53		55		85		63		72	

α, град	Сила света светильников, кд							
	ОЛСЗ		ЛВО01/П-01		ЛСП01-2Х150-15		УВЛН6; УВЛВ6	
	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$	$I_{пр}$	$I_{п}$
0	89	89	137	137	307	307	324	324
5	89	91	136	136	307	305	318	304
15	85	97	130	133	285	335	288	258
25	78	105	116	127	252	304	252	190
35	68	110	98	117	209	146	214	134
45	56	113	78	98	161	37	160	104
55	43	113	54	80	112	9	94	84
65	29	111	20	64	66	8	40	60
75	16	106	10	48	35	7	20	40
85	4	99	2	41	16	6	12	12
90	2	96	–	40	7	6	–	–
95	3	93	–	39	9	6	–	–
105	3	86	–	36	15	6	–	–
115	4	76	–	30	24	10	–	–
125	6	65	–	27	34	16	–	–
135	7	53	–	24	49	22	–	–
145	9	39	–	20	58	29	–	–
155	11	24	–	16	68	45	–	–
165	11	15	–	13	78	59	–	–
175	11	11	–	2	81	72	–	–
180	11	11	–	–	81	81	–	–
КПД,%	75		48		69		61	

#### 5.4.7. Примеры расчета освещения с учетом светящихся линий

**Пример 1.** Рабочие места в сборочном цехе расположены вдоль конвейера (рис. 58), где 1 – лента конвейера; 2 – рабочие места.

Площадь помещения –  $14 \times 28 \text{ м}^2$ , высота – 4,5 м. Длина конвейера – 11 м. Над рабочими столами на высоте 0,5 м установлены светильники с люминесцентными лампами, ширина рабочего стола – 0,6 м. Рассчитать общее и местное освещение и мощность осветительной установки.

**Расчет.** Общее и местное освещение рассматриваем как светящиеся линии. Схема общего освещения представлена на рис. 58. Для общего освещения используются светильники серии ЛСП02 (01) с лампами ЛБ. Расчетная высота подвеса – 4 м.

По стандарту при комбинированной системе освещенность для выполнения монтажных работ  $E_k = 2000$  лк. Общее освещение должно быть не менее 10 % от  $E_k$ , т. е.  $E_{общ} = 0,1 \cdot 2000 = 200$  лк. Контрольную точку А для расчета общего освещения берем на расстоянии  $h = 4$  м и посередине между рядами светильников (рис. 59). Точка А освещается шестью полурядами, обозначенными цифрами 1, 2...6 на рис. 59. Для каждого полуряда по схеме рис. 59 определяют размеры  $p$  и  $L$ . Далее рассчитывают  $p' = p/h$  и  $L' = L/h$ . Относительную освещенность  $\varepsilon$  определяют по линейным изолюксам, для светильников группы 2 – по рис. 56. Светильники серии ЛСП02 (01) относятся ко 2-й группе. Значения  $\varepsilon$  для рассматриваемой схемы общего освещения даны в табл. 70.

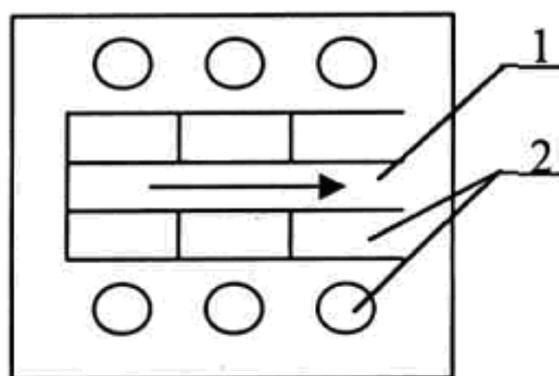


Рис. 58. Расположение рабочих мест вдоль конвейера

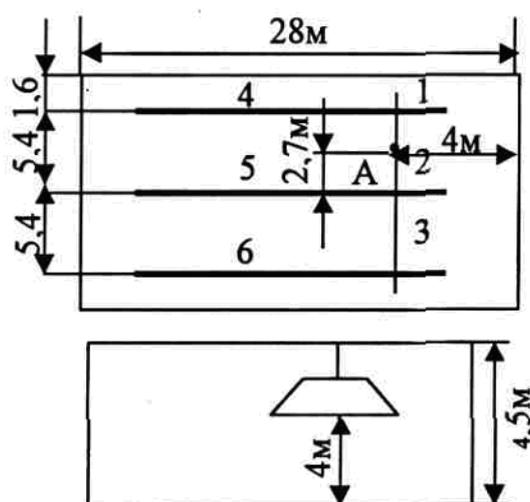


Рис. 59. Схема размещения светильника в плане и разрезе

Таблица 70. Результаты расчета относительной освещенности в контрольной точке

Номер полуряда	$p$	$L$	$p' = p/h$	$L' = L/h$	$\varepsilon$
1,2	2,7	4	0,67	1	$2 \cdot 70 = 140$
3	8,1	4	2,02	1	$1 \cdot 8 = 8$
4,5	2,7	23	0,67	$5,7(L' = 4)$	$2 \cdot 91 = 182$
6	8,1	23	2	$5,7(L' = 4)$	$1 \cdot 13 = 13$
					Итого $\sum \varepsilon = 343$ лк

Плотность светового потока  $\Phi$  при коэффициенте запаса  $K_3 = 1,5$  и  $\mu = 1,1$  будет равна

$$\Phi' = \frac{1000 \cdot 200 \cdot 1,5 \cdot 4}{1,1 \cdot 343} = 3180 \text{ лм/м.}$$

В каждом ряду полный световой поток ламп  $\Phi$  должен составлять  $\Phi = 3180 \cdot 28 = 89054$  лм.

В качестве источников света можно использовать люминесцентные лампы ЛБ40 с номинальным световым потоком  $\Phi_{\text{ном}} = 3120$  лм, устанавливая по две лампы в каждый светильник. Таким образом, количество светильников  $N$  в одном ряду будет равно

$$N = \frac{89054}{2 \cdot 3120} = 14.$$

Длина светильника 1234 мм и все 14 светильников вписываются в ряд с небольшими разрывами при равномерном распределении  $d = 0,7$  м. При лампах большей мощности разрывы между светильниками были бы больше.

Мощность осветительной установки общего освещения

$$P_{\text{общ}} = 14 \cdot 2 \cdot 40 = 1120 \text{ Вт.}$$

Для местного освещения с учетом разряда зрительных работ при комбинированной освещенности  $E_{\text{к}} = 1250$  лк,  $E_{\text{м}} = 1050$  лк.

Схема местного освещения приведена на рис. 60, 61, где указаны длина конвейера, положение контрольной точки А посередине конвейера. Точка А освещается двумя полурядами 1, 2 длиной  $L = 8,5$  м. Светильники  $S$  установлены на высоте 0,5 м от рабочей поверхности, проекция расстояния от источника до контрольной точки – 0,3 м.

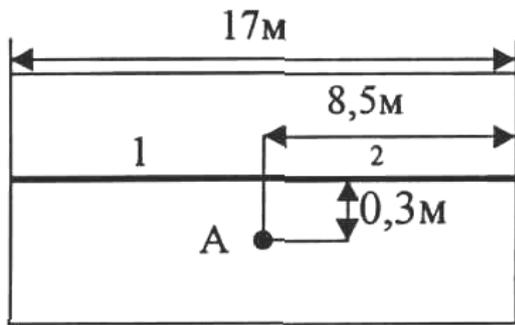


Рис. 60. Выбор контрольной точки при расчете местного освещения

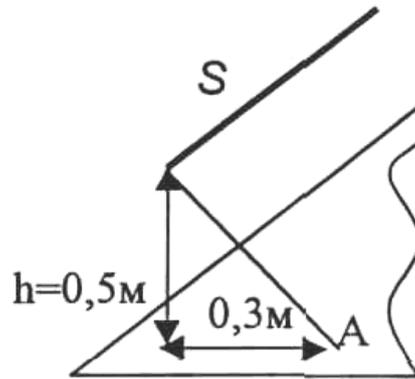


Рис. 61. Схема расположения светильника над рабочей поверхностью

Значения  $p' = 0,3/0,5 = 0,6$  и  $L' = \frac{8,5}{0,5} = 17$  ( $L'$  принимаем равной 4). По графику линейных изолукс для светильника ЛП012 относительная освещенность для одного полуряда  $\varepsilon = 128$ , суммарная относительная освещенность  $\sum \varepsilon = 2 \cdot 128 = 256$ .

Плотность потока местного освещения

$$\Phi' = \frac{1000 \cdot 1050 \cdot 1,5 \cdot 0,5}{1,1 \cdot 256} 2796 \text{ лм/м.}$$

Общий световой поток  $\Phi = 2796 \cdot 17 = 47540$  лм.

При использовании люминесцентных ламп ЛБ20 с номинальным световым потоком 1180 лм общее число светильников местного освещения

$$n = \frac{47540}{2 \cdot 1180} = 20.$$

Светильники полностью заполняют ряд ( $20 \cdot 0,85 = 17$  м) без разрывов.

Рабочие столы вдоль линии конвейера установлены с двух сторон (см. рис. 58), следовательно, мощность осветительной установки местного освещения – 80 ламп (40 ламп  $\cdot$  2)

$$P_m = 80 \cdot 20 = 1600 \text{ Вт.}$$

Мощность всей осветительной системы

$$P = 1600 + 1120 = 2720 \text{ Вт.}$$

**Пример 2.** Над рабочим столом на высоте 0,8 м установлены два светильника типа МЛ-2  $\times$  80 с V-образными лампами ЛБУ80.

Необходимо оценить соответствие нормативным требованиям  $E = 400$  лк освещенности на рабочей поверхности. Схема расположения светильников представлена на рис. 62.

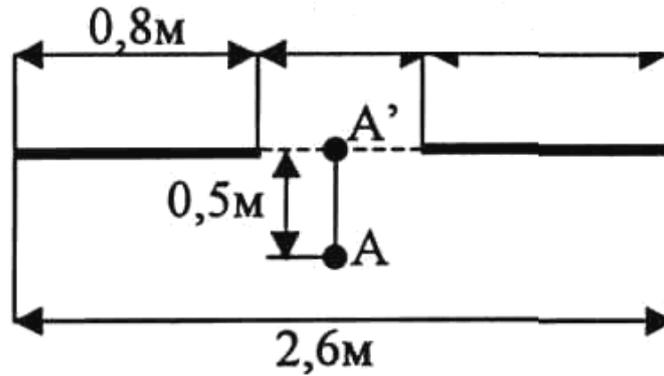


Рис. 62. Расположение светильников местного освещения с разрывом и положение контрольной точки

Разрыв между светильниками – 1 м. Контрольная точка берется посередине между светильниками и удалена от линии, на которой расположены светильники, на 0,5 м.

Из светотехнических характеристик светильников известны кривые распределения силы света (табл. 94 подразд. 5.7).

Световой поток лампы ЛБУ80 – 3680 лм, при разрыве  $\lambda > 0,5h$  плотность светового потока определяется для сплошного участка

$$\Phi = (3680 \cdot 2)/0,8 = 9200 \text{ лм/м.}$$

Каждый полуряд дополняется до точки  $A'$ , тогда длина полуряда  $L = 0,8 + 0,5 = 1,3$  м, следовательно,  $L' = 1,3/0,8 = 1,6$ ;  $p' = 0,5/0,8 = 0,63$ .

Значение вспомогательной функции для полуряда  $f(p', L') = 0,45$  и  $\alpha = 35^\circ$ .

Для добавленного отрезка  $p' = 0,63$ ,  $L' = 0,5/0,8 = 0,63$ , вспомогательная функция  $f(p', L') = 0,28$ .

Для фактического участка  $f(p', L') = 0,45 - 0,28 = 0,17$ .

По табл. 69  $I_{35} = 164$  кд (для суммарного потока ламп в светильнике – 1000 лм). Тогда суммарная относительная освещенность

$$\Sigma \varepsilon = 2\varepsilon = 2 \cdot 164 \cdot 0,17 = 56 \text{ лк.}$$

Искомая освещенность рабочей поверхности

$$E = \frac{\Phi'_{\mu} \Sigma \varepsilon}{1000 K_3 h} = \frac{9200 \cdot 1,1 \cdot 56}{1000 \cdot 1,5 \cdot 0,8} = 472 \text{ лк.}$$

По результатам расчета освещенность рабочей поверхности соответствует нормативным требованиям.

## 5.5. Естественное освещение

Помещения с постоянным пребыванием людей должны иметь, как правило, естественное освещение, характеризуемое отношением естественной освещенности, создаваемой внутри помещения светом неба  $E_B$  (непосредственным или отраженным), к значению наружной освещенности земной поверхности от небосвода  $E_H$ , выраженным в процентах. Это отношение принято называть **коэффициентом естественной освещенности КЕО ( $e$ )**.

$$e = E_B/E_H \cdot 100 \%. \quad (307)$$

Естественное освещение подразделяется на боковое, если световые проемы (окна) расположены в наружных стенах; верхнее, если световые проемы устроены в фанаре, крыше, стенах, в местах перепада высот здания; комбинированное – сочетание верхнего и бокового освещений. Нормированные значения КЕО приводятся из [27] в табл. 83 подразд. 5.7. Для производственных помещений со зрительными работами 1 – 3-го разряда нормируется только совмещенное освещение – освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным.

Нормированное значение КЕО ( $e_n$ ) для зданий, располагаемых в различных районах, следует определять по формуле  $e_n = em_N$ , где  $N$  – номер группы административного района (табл. 96 подразд. 5.7);  $e$  – значение КЕО по табл. 83 и 84 подразд. 5.7;  $m_N$  – коэффициент светового климата по табл. 71. Для обеспечения нормированного значения КЕО площадь световых проемов при боковом освещении определяют по формуле

$$S_6 = \frac{e_n S K_3 \eta K_{зд}}{100 \tau_0 r_1}, \quad (308)$$

при верхнем

$$S_B = \frac{e_n S K_3 \eta \phi}{100 \tau_0 r_2 K_\phi}, \quad (309)$$

где  $e_n$  – нормированное значение коэффициента естественной освещенности, КЕО;

$S$  – площадь пола помещения;

$K_3$  – коэффициент запаса по табл. 85 подразд. 5.7;

$\eta$  – световая характеристика окна, определяется по табл. 73;

$K_{зд}$  – коэффициент здания, учитывающий затенение окон противостоящими зданиями, определяемый по табл. 72;

$\tau$  – общий коэффициент светопропускания, определяется по формуле  $\tau_0 = \tau_1\tau_2\tau_3\tau_4\tau_5$ , где  $\tau_1$  – коэффициент светопропускания материала по табл. 75;  $\tau_2$  – коэффициент, учитывающий потери света в переплетах светопроема по табл. 76;  $\tau_3$  – коэффициент, учитывающий потери света в несущих конструкциях по табл. 77 (при боковом освещении  $\tau_3 = 1$ );  $\tau_4$  – коэффициент, учитывающий потери света в солнцезащитных устройствах по табл. 74;  $\tau_5$  – коэффициент, учитывающий потери света в защитной сетке, фонарями, принимают равным 0,9;

$r_1$  – коэффициент, учитывающий повышение КЕО при боковом освещении благодаря свету, отраженному от поверхностей помещения и подстилающего слоя, прилегающего к зданию, определяемый по табл. 78;

$\eta_\phi$  – световая характеристика фонаря или светового проема в плоскости покрытия;

$r_2$  – коэффициент, учитывающий повышение КЕО при верхнем освещении благодаря свету, отраженному от поверхностей помещения;

$K_\phi$  – коэффициент, учитывающий тип фонаря.

Таблица 71. Значения коэффициента светового климата

Световые проемы	Ориентация световых проемов по сторонам горизонта	Номер группы административных районов				
		1	2	3	4	5
		Коэффициент светового климата $m$				
В наружных стенах зданий	С	1,0	0,9	1,1	1,2	0,8
	СВ, СЗ	1,0	0,9	1,1	1,2	0,8
	З, В	1,0	0,9	1,1	1,1	0,8
	ЮВ, ЮЗ	1,0	0,85	1,0	1,1	0,8
	Ю	1,0	0,85	1,0	1,1	0,75
В прямоугольных и трапециевидных фонарях	С-Ю	1,0	0,9	1,1	1,2	0,75
	СВ-ЮЗ	1,0	0,9	1,2	1,2	0,7
	ЮВ-СЗ	1,0	0,9	1,2	1,2	0,7
	В-З	1,0	0,9	1,1	1,2	0,7
В фонарях типа «Шед»	С	1,0	0,9	1,1	1,2	0,7
В зенитных фонарях	–	1,0	0,9	1,2	1,2	0,75

*Примечание.* Группы административных районов России по ресурсам светового климата приведены в табл. 96 подразд. 5.7.

Значение коэффициента здания  $K_{зд}$  в зависимости от отношения расстояния между рассматриваемым и противостоящим зданием  $P$  к высоте расположения карниза противостоящего здания над подоконником рассматриваемого окна  $H_{зд}$  представлено в табл. 72.

Таблица 72. Значение коэффициента здания  $K_{зд}$

$P/H_{зд}$	0,5	1,0	1,5	2,0	3 и более
$K_{зд}$	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0

Таблица 73. Значения световой характеристики окна  $\eta$

Отношение длины помещения $A$ к его глубине $B$	Значение $\eta$ при отношении глубины помещения $B$ к его высоте от уровня условной рабочей поверхности до верха окна $h_1$							
	1	1,5	2	3	4	5	7,5	10
4 и более	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	11,0	12,5
3,0	7,5	8,0	8,5	9,5	10,0	11,0	12,5	14,0
2,0	8,5	9,0	9,5	10,5	11,5	13,0	15,0	17,0
1,5	9,5	10,5	13,0	15,0	17,0	19,0	21,0	23,0
1,0	11,0	15,0	16,0	18,0	21,0	20,0	26,5	29,0
0,5	18,0	23,0	31,0	37,0	45,0	54,0	66,0	–

Таблица 74. Значение коэффициента  $\tau_4$

№ п/п	Солнцезащитные устройства, изделия и материалы	Значение $\tau_4$
1	Убирающиеся регулируемые жалюзи и шторы (междустекольные, внутренние, наружные)	1
2	Стационарные жалюзи и экраны с защитным углом не более $45^\circ$ при расположении пластин жалюзи или экранов под углом $40^\circ$ к плоскости окна: – горизонтальные – вертикальные	0,65 0,75
3	Горизонтальные козырьки: – с защитным углом не более $30^\circ$ – с защитным углом от $15^\circ$ до $45^\circ$ (многоступенчатые)	0,8 0,9 – 0,6

Таблица 75. Значение коэффициента  $\tau_1$

Вид светопропускающего материала	Стекло оконное листовое			Стекло витринное толщиной 6 – 8 мм	Стекло листовое армированное	Стекло листовое узорчатое	Стекло листовое со специальными свойствами		Органическое стекло		Пустотелые стеклянные блоки		Стеклопакеты
	одинарное	двойное	тройное				солнцезащитное	контрастное	прозрачное	молочное	светорассеивающие	светопрозрачные	
Значение $\tau_1$	0,9	0,8	0,75	0,8	0,6	0,65	0,65	0,75	0,9	0,6	0,5	0,55	0,7

Таблица 76. Значение коэффициента  $\tau_2$

Вид светопропускающего материала	Переплеты для окон и фонарей промышленных зданий							Переплеты для окон жилых, общественных и вспомогательных зданий							
	деревянные			стальные				деревянные				металлические			
	одинарные	спаренные	двойные раздельные	одинарные открывающиеся	одинарные глухие	двойные открывающиеся	двойные глухие	одинарные	спаренные	двойные раздельные	с тройным остеклением	одинарные	спаренные	двойные раздельные	с тройным остеклением
Значение $\tau_2$	0,75	0,7	0,6	0,75	0,9	0,6	0,8	0,8	0,75	0,65	0,5	0,9	0,85	0,8	0,7

Таблица 77. Значение коэффициента  $\tau_3$

Несущие конструкции покрытий	Стальные фермы	Железобетонные и деревянные фермы и арки	Балки и рамы сплошные при высоте сечения	
			50 см и более	менее 50 см
Значение $\tau_3$	0,9	0,8	0,8	0,9

Таблица 78. Значения коэффициентов

$B/h_1$	$1/B$	Средневзвешенный коэффициент отражения поверхностей помещения $P_{cp}$								
		0,5			0,4			0,3		
		Отношение длины помещения А к его глубине В								
		0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более
При боковом освещении										
От 1 до 1,5	0,1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1,05	1	1
	0,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1
	1	2,1	1,9	1,5	1,8	1,6	1,3	1,4	1,3	1,2
Более 1,5 до 2,5	0	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1
	0,3	1,3	1,2	1,1	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,05
	0,5	1,85	1,6	1,3	1,5	1,35	1,2	1,3	1,2	1,1
	0,7	2,45	2,15	1,7	2	1,7	1,4	1,55	1,4	1,25
Более 2,5 до 3,5	1	3,8	3,3	2,4	2,8	2,4	1,8	2	1,8	1,5
	0,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1	1	1	1	1
	0,2	1,15	1,1	1,05	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1,05
	0,3	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05
	0,4	1,35	1,25	1,2	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1
	0,5	1,6	1,45	1,3	1,36	1,25	1,2	1,25	1,15	1,1
	0,6	2	1,75	1,45	1,6	1,45	1,3	1,4	1,3	1,2
	0,7	2,6	2,2	1,7	1,9	1,7	1,4	1,6	1,6	1,3
	0,8	3,6	3,1	2,1	2,35	2	1,55	1,9	1,7	1,4
	0,9	5,3	4,2	3	2,9	2,45	1,9	2,2	1,85	1,5
1	7,2	5,4	4,3	3,6	3,1	2,4	2,6	2,2	1,7	
Более 3,5	0,1	1,2	1,15	1,1	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1
	0,2	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,1	1,05	1,05
	0,3	1,75	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2	1,25	1,2	1,1
	0,4	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	1,4	1,3	1,2
	0,5	3,4	2,9	2,5	2	1,8	1,5	1,7	1,5	1,3
	0,6	4,6	3,8	3,1	2,4	2,1	1,8	2	1,8	1,5
	0,7	6	4,7	3,7	2	2,6	2,1	2,3	2	1,7
	0,8	7,1	5,8	4,7	3,4	2,9	2,4	2,6	2,3	1,9
	0,9	9	7,1	5,6	4,3	3,6	3	3	2,6	2,1
	1	10	7,3	5,7	5	4,1	3,5	3,5	3	2,5
При боковом двустороннем освещении										
От 1 до 1,5	0,1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1,05	1	1
	0,5	1,35	1,25	1,15	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
	1	1,6	1,4	1,25	1,45	1,3	1,15	1,25	1,15	1,1

$V/h_1$	$1/B$	Средневзвешенный коэффициент отражения поверхностей помещения $P_{ср}$								
		0,5			0,4			0,3		
		Отношение длины помещения А к его глубине В								
		0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более
При боковом двустороннем освещении										
Более 1,5 до 2,5	0	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1
	0,3	1,3	1,2	1,1	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,05
	0,5	1,8	1,45	1,25	1,4	1,25	1,15	1,25	1,15	1,1
	0,7	2,1	1,75	1,5	1,75	1,45	1,2	1,3	1,25	1,2
	1	2,35	2	1,6	1,9	1,6	1,5	1,5	1,35	1,2
Более 2,5 до 3,5	0,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1	1	1	1	1
	0,2	1,15	1,1	1,05	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1,05
	0,3	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05
	0,4	1,35	1,2	1,2	1,2	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1
	0,5	1,5	1,4	1,25	1,3	1,2	1,15	1,2	1,1	1,1
	0,6	1,8	1,6	1,35	1,5	1,35	1,2	1,35	1,25	1,15
	0,7	2,25	1,9	1,45	1,7	1,5	1,25	1,5	1,4	1,2
	0,8	2,8	2,4	1,9	1,9	1,6	1,3	1,65	1,5	1,25
	0,9	3,65	2,9	2,6	2,2	1,9	1,5	1,8	1,6	1,3
	1	4,45	3,35	2,65	2,4	2,1	1,6	2	1,7	1,4
Более 3,5	0,1	1,2	1,15	1,1	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1
	0,2	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,1	1,05	1,05
	0,3	1,75	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2	1,25	1,2	1,1
	0,4	2,35	2	1,75	1,6	1,4	1,3	1,35	1,25	1,15
	0,5	3,25	2,8	2,4	1,9	1,7	1,45	1,65	1,5	1,3
	0,6	4,2	3,5	2,85	2,25	2	1,7	1,95	1,7	1,4
	0,7	5,1	4	3,2	2,55	2,7	1,85	2,1	1,8	1,5
	0,8	5,8	4,5	3,6	2,8	2,9	2,95	2,25	2	1,6
	0,9	6,2	4,9	3,9	3,4	2,6	2,3	2,45	2,1	1,7
	1	6,3	5	4	3,5	2,7	2,4	2,6	2,25	1,8

### **Пример расчета естественного освещения**

Дать оценку соответствия нормированным значениям коэффициента естественной освещенности (КЕО) в производственном помещении, расположенном на втором этаже в правом крыле здания. Все размеры приведены на рис. 63.

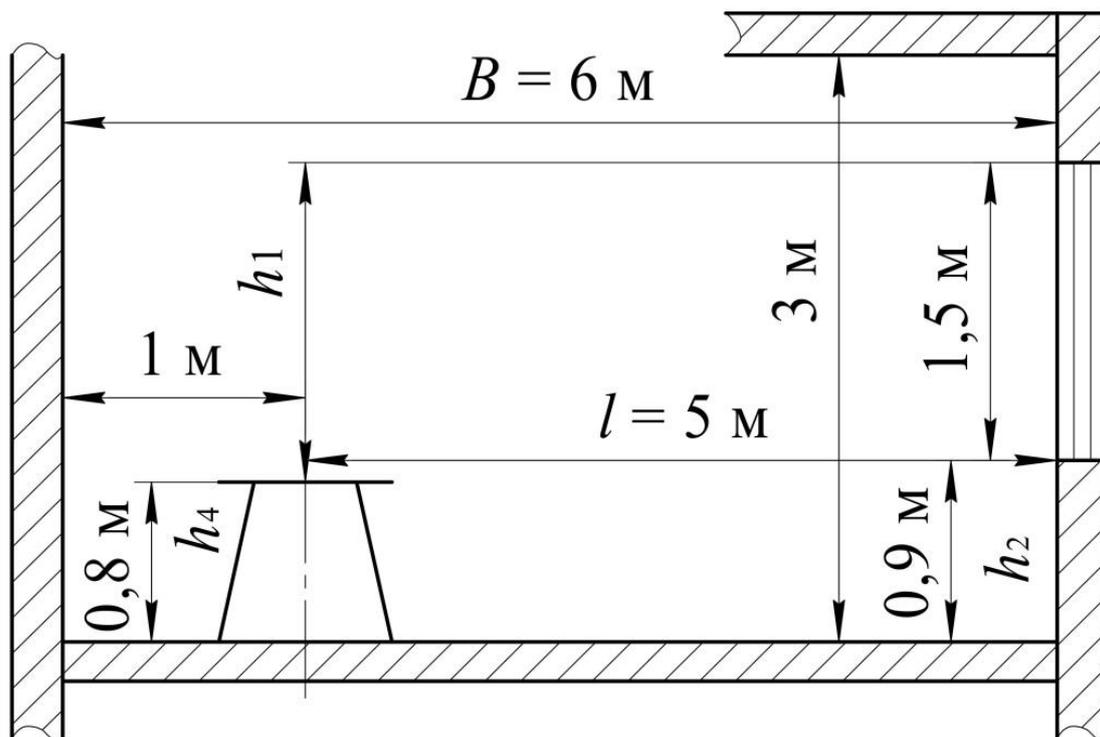


Рис. 63. Разрез помещения с указанием размеров расположения оконного проема и рабочего места

**Расчет.** Нормированное значение КЕО  $e_n$  при средней точности зрительных работ (наименьшем объекте различения  $0,7 \text{ мм}$ ) в производственном помещении с оконными проемами в наружной стене и ориентированными на юго-запад, во втором административном районе по ресурсам светового климата  $e_n = 0,9 \dots 0,85 = 0,765 \% \approx 0,8 \%$ . Значение  $e_n$  округляется до десятых долей.

Площадь помещения  $S$  при длине  $8 \text{ м}$  и ширине  $6 \text{ м}$  будет равна  $48 \text{ м}^2$ . Коэффициент запаса для производственных помещений с небольшим содержанием пыли (менее  $1 \text{ мг/м}^3$ ) равен  $K_3 = 1,3$ .

Для определения световой характеристики окна  $\eta$  необходимо найти отношение длины помещения к его глубине  $\frac{A}{B} = \frac{8}{6} = 1,3$  и отношение глубины помещения  $B$  к его высоте  $h_1$  от уровня условной рабочей поверхности до верха окна (рис. 63)  $\frac{B}{h_1} = \frac{6}{16} = 3,75$ ; из табл. 73  $\eta = 19$ .

Для нахождения коэффициента  $K_{зд}$ , учитывающего затенение окон противостоящими зданиями, необходимо найти отношение расстояния

между рассматриваемым и противостоящим зданием  $P$  к высоте расположения карниза противостоящего здания над подоконником рассматриваемого окна  $H_{зд}$  (рис. 64):  $H_{зд} = 16,5 - 3,2 - 0,9 = 12,4$  м.

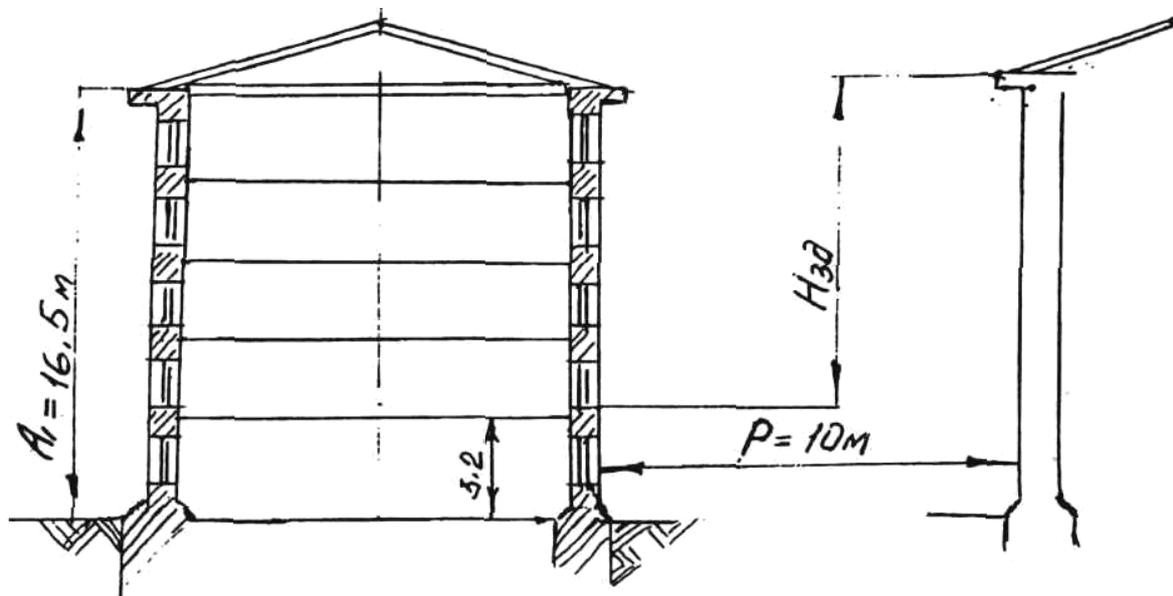


Рис. 64. Схема расположения зданий при расчете естественного освещения

Таким образом,  $\frac{P}{H_{зд}} = \frac{10}{12,4} = 0,8$ . Далее из табл. 72 следует  $H_{зд} = 1,5$ .

Общий коэффициент светопропускания  $\tau_0$  при боковом освещении и отсутствии солнцезащитных устройств  $\tau_0 = \tau_1 \tau_2$ , где коэффициент светопропускания  $\tau_1$  для двойного оконного листового стекла равен 0,8 (см. табл. 75); а коэффициент, учитывающий потери света в переплетах светопроемов,  $\tau_2$  для двойных отдельных оконных переплетов из табл. 76 равен 0,6, следовательно,  $\tau_0 = 0,8 \cdot 0,6 = 0,48$ .

При определении коэффициента, учитывающего повышение КЕО за счет отраженного света от поверхностей помещения и подстилающего слоя,  $r_1$  находят:

- средневзвешенное значение коэффициентов отражения поверхностей помещения  $\rho_{ср}$  при коэффициентах отражения потолка, стен и пола (рабочей поверхности) соответственно  $\rho_{п} = 70 \%$ ,  $\rho_{с} = 50 \%$ ,  $\rho_{р} = 30 \%$ , значение  $\rho_{ср} = (0,7 + 0,5 + 0,3)/3 = 0,5$ ;

- отношение длины помещения к его глубине  $A/B = 1,3$ ;

– отношение глубины помещения  $B$  к высоте от уровня условной рабочей поверхности до верха окна  $h_1$ :  $B/h_1 = 3,75$ ;

– отношение расстояния  $l$  расчетной точки от наружной стены (см. рис. 64) к глубине помещения  $B$ . Расчетная точка при боковом освещении берется на расстоянии 1 м от стены, наиболее удаленной от светового проема, т. е.  $l = 5$  м. Следовательно,  $l/B = 5/6 = 0,8$ .

Из табл. 78  $r_1$  ( $\rho_{\text{ср}}, A/B, B/h_1, l/B$ ) = 5,1.

Таким образом, предполагаемая площадь оконных проемов  $S_0$  будет равна

$$S_0 = \frac{0,8 \cdot 48 \cdot 1,3 \cdot 19 \cdot 1,5}{100 \cdot 0,48 \cdot 5,1} = 5,8 \text{ м}^2.$$

В рассматриваемом помещении три оконных проема по  $1,5 \times 1,4$  м и их общая площадь  $S_0$ , следовательно, значение КЕО соответствует нормируемому в [27].

## **5.6. Задания для самостоятельных расчетов естественного и искусственного освещения**

Индивидуальные варианты для выполнения расчета формируются из четырех предполагаемых заданий (табл. 79). По указаниям преподавателя количество заданий в предполагаемом варианте расчета может быть изменено, например, задание 1 может быть дополнено заданием 4.

Например, если предлагается выполнить задание 1, а порядковый номер по списку в журнале 25, то исходные данные для расчета берутся из табл. 80 вариант 017 и табл. 81 вариант 11. При выполнении дополнительного задания 3 исходные данные берутся из табл. 82 вариант 3 М. При выполнении дополнительного задания 3 исходные данные берутся из табл. 82.

Недостающие данные (коэффициент запаса, высоту свеса светильников, высоту рабочей поверхности, коэффициент неравномерности) студентам предлагается найти самостоятельно исходя из требований нормативных документов, особенностей варианта задания и рекомендаций, приведенных в настоящем учебном пособии.

*Таблица 79. Задания для выполнения расчетов  
производственного освещения*

№ п/п	Задание 1		Задание 2 и 3			Задание 2 и 4	
	Табл. 80	Табл. 81	Табл. 80	Табл. 81	Табл. 82	Табл. 80	Табл. 81
1	04	1	06	1	1 М	04	Л
2	01	3	05	2	2 М	02	2
3	02	2	08	3	3 М	03	10
4	02	6	09	4	4 М	04	7
5	03	10	010	5	5 М	05	8
6	05	6	011	6	6 М	06	9
7	07	8	012	7	7 М	07	10
8	08	5	013	8	8 М	08	5
9	09	11	014	9	9 М	09	6
10	010	6	015	10	10 М	010	7
11	011	20	016	11	11 М	011	12
12	012	19	017	3	12 М	012	13
13	013	18	018	10	13 М	013	14
14	014	17	019	17	14 М	014	15
15	015	16	020	4	15 М	015	16
16	016	15	021	5	16 М	016	17
17	017	14	022	8	17 М	017	18
18	018	13	023	7	18 М	018	19
19	019	12	034	3	19 М	019	20
20	020	11	014	5	17 М	020	21
21	021	14	015	6	6 М	021	22
22	022	15	016	7	7 М	022	23
23	023	18	017	8	8 М	023	24
24	024	17	018	9	15 М	017	14
25	017	11	019	10	3 М	018	12
26	011	8	014	7	4 М	015	9
27	010	7	016	8	6 М	010	7
28	012	13	018	9	7 М	013	10

Таблица 80. Варианты параметров помещений

Номер варианта	Длина помещения $A$ , м	Ширина помещения $B$ , м	Высота помещения $H$ , м	Коэффициенты отражения, $\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{с}} - \rho_{\text{р}}$ , %
01	3,0	3,0	2,9	70 – 50 – 30
02	4,5	3,0	2,9	70 – 50 – 10
03	6,0	3,0	2,9	50 – 30 – 10
04	9,0	3,0	2,9	30 – 10 – 10
05	2	3,0	2,9	70 – 50 – 30
06	15	4,5	2,9	70 – 50 – 10
07	9,0	4,5	3,2	70 – 50 – 30
08	12	6,0	3,2	70 – 50 – 10
09	15	9,0	3,2	50 – 30 – 10
010	15	6,0	2,9	70 – 50 – 30
011	18	4,5	3,2	50 – 30 – 10
012	21	4,5	3,2	30 – 10 – 10
013	24	4,5	3,5	70 – 50 – 30
014	27	6,0	3,8	70 – 50 – 10
015	30	6,0	4,1	50 – 30 – 10
016	36	6,0	4,6	30 – 10 – 10
017	18	6,0	3,8	70 – 50 – 30
018	21	9,0	4,1	70 – 50 – 10
019	24	6,0	4,6	50 – 30 – 10
020	27	9,0	4,6	70 – 50 – 30
021	30	9,0	4,1	70 – 50 – 10
022	36	12	4,1	50 – 30 – 10
023	18	12	3,8	70 – 50 – 10
024	21	12	4,1	50 – 30 – 10

Таблица 81. Варианты условий зрительной работы

Номер варианта	Размер объекта различения, мм	*Контраст фона и объекта, отн. ед.	*Коэффициент отражения фона, %	**Длительность наблюдения, %
1	0,1	0,6	70	—
2	0,2	0,7	80	—
3	0,4	0,8	60	—
4	0,1	0,3	50	—
5	0,2	0,4	60	—
6	0,4	0,3	30	—
7	0,1	0,4	30	—
8	0,2	0,3	30	—
9	0,2	—	—	80
10	0,4	—	—	60
11	0,7	0,6	50	—
12	3,0	0,7	30	—
13	Общ. набл.	0,8	30	—
14	0,7	0,4	30	—
15	3,0	0,3	50	—
16	Общ. набл.	0,25	10	—
17	0,4	0,1	50	—
18	0,7	0,1	10	—
19	3,0	0,15	50	—
20	Общ. набл.	0,15	30	—
21	0,2	—	—	50
22	0,4	—	—	40
23	0,7	—	—	50
24	0,7	—	—	80

\* контраст и коэффициент отражения фона задаются для производственных помещений;

\*\* длительность наблюдения задается для административных помещений в процентах от времени работы.

По результатам выполненных расчетов составляется отчет. Отчет должен состоять из титульного листа, номера варианта, формулировки задания, таблицы исходных данных, обоснования самостоятельного выбора расчетных величин, эскизов размещения светильников, расчетных формул, цифровых расчетов и выводов.

**Задание 1.** Методом коэффициента использования светового потока рассчитать количество и мощность разрядных источников света, необходимых для создания нормативной освещенности в помещении. Аналогичный расчет проделать для ламп накаливания. Сравнить эксплуатационные расходы при использовании источников различного типа.

Таблица 82. Варианты компоновки рабочих мест

Номер варианта	Схема компоновки рабочих мест (см. рис. 58)	Высота установки светильника над рабочим столом, мм	Ширина рабочего стола, мм	
1 М		300	350	
2 М		350		
3 М		400		
4 М		500		
5 М		600		500
6 М		700		
7 М		800		
8 М		350	400	
9 М		450		
10 М		550		
11 М		650	500	
12 М		750		
13 М		850		
14 М			300	400
15 М	350			
16 М	400			
17 М	600		600	
18 М	700			
19 М	800			

**Задание 2.** Рассчитать общее освещение и мощность осветительной установки при использовании люминесцентных ламп и размещении светильников в виде длинных линий.

**Задание 3.** Рассчитать местное освещение рабочих мест и мощность осветительной установки. Выполнить эскиз расположения светильников над рабочим местом.

**Задание 4.** При каких условиях в производственном помещении с совмещенным освещением будет обеспечено нормальное значение коэффициента естественной освещенности (КЕО). Здание расположено во Владимирской области, имеет пять этажей. Затенение окон создается противостоящим зданием, находящимся на расстоянии  $P = 15$  м (см. рис. 64). Производственное помещение имеет одностороннее боковое освещение. Высота оконных проемов 1,7 м на уровне  $h_2 = 0,8$  м от пола (см. рис. 63). Двойные оконные блоки застеклены оконным листовым стеклом. При расчете необходимого количества проемов их ширина выбирается самостоятельно.

## 5.7. Справочные таблицы

Таблица 83. Нормируемая освещенность производственных помещений

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Фон	Искусственное освещение		Естественное освещение		Совмещенное освещение		
						Освещенность при освещении, лк		КЕО $e_n$ , % при освещении				
						комбинированном		общем	верхнем или комбинированном	боковом	верхнем или комбинированном	боковом
						всего	в том числе общего					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Наивысшей точности	Менее 0,15	I	a	Малый	Темный	5000 4500	500 500	– –	–		6,0	2,0
			б	Малый Средний	Средний Темный	4000 3500	400 400	1250 1000				
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2500 2000	300 200	750 600				
			г	Средний Большой	Светлый Средний	1500 1250	200 200	400 300				
Очень высокой точности	От 0,15 до 0,30	II	a	Малый	Темный	4000 3500	400 400	– –	–		4,2	1,5
			б	Малый Средний	Средний Темный	3000 2500	300 300	750 600				
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2000 1500	200 200	500 400				
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	1000 – 750	200 – 200	300 – 200				

Продолжение табл. 83

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Фон	Искусственное освещение			Естественное освещение		Совмещенное освещение	
						Освещенность при освещении, лк			КЕО $e_n$ , % при освещении			
						комбинированном		общем	верхнем или комбинированном	боковом	верхнем или комбинированном	боковом
						всего	в том числе общего					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Высокой точности	От 0,30 до 0,50	III	а	Малый	Темный	2000 1500	200 200	500 400	—		3,0	1,2
			б	Малый Средний	Средний Темный	1000 750	200 200	300 200				
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	750 600	200 200	300 200				
			г	Средний Большой	Светлый Средний	400	200	200				
Средней точности	Св. 0,5 до 1,0	IV	а	Малый	Темный	750	200	300	4	1,5	2,4	0,9
			б	Малый Средний	Средний Темный	500	200	200				
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	400	200	200				
			г	Средний Большой	Светлый Средний	—	—	200				
Малой точности	Св. 1 до 5	V	а	Малый	Темный	400	200	300	3	1	1,8	0,6
			б	Малый Средний	Средний Темный	—	—	200				

Окончание табл. 83

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Малой точности	Св. 1 до 5	V	в	Малый Большой Средний	Светлый Средний Темный	–	–	200				
			г	Средний Большой	Светлый Средний	–	–	200				
Грубая (очень малой точности)	Более 5	VI	–	Независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном		–	–	200	3	1	1,8	0,6
Работа со светящимися материалами и изделиями в горячих цехах	Более 0,5	VII	–	То же		–	–	200	3	1	1,8	0,6
Общее наблюдение за ходом производственного процесса: постоянное		VIII	а	>>		–	–	200	3	1	1,8	0,6
периодическое при постоянном пребывании людей в помещении			б	>>		–	–	75	1	0,3	0,7	0,2
периодическое при периодическом пребывании людей в помещении			в	>>		–	–	50	0,7	0,2	0,5	0,2
Общее наблюдение за инженерными коммуникациями			г	>>		–	–	20	0,3	0,1	0,2	0,1

Примечание. Освещенность при использовании ламп накаливания следует снижать по шкале освещенности: 20; 30; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1250; 1500; 2000; 2500; 3000; 3500; 4000; 4500; 5000 лк:

- а) на одну ступень при системе комбинированного освещения, если нормируемая освещенность составляет 150 лк и более;
- б) то же, общего освещения для разрядов I – V, VI;
- в) на две ступени при системе общего освещения для разрядов VI и VIII.

Таблица 84. Нормируемая освещенность жилых, общественных, административно-бытовых зданий

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Относительная производительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность	Искусственное освещение на рабочей поверхности от системы общего освещения, лк	Естественное освещение	
						КЕО $e_n$ , % при освещении	
						верхнем или боковом	боковом
Различение объектов при фиксированной и нефиксированной линии зрения:							
– очень высокой точности	От 0,15 до 0,30	А	1 2	Не менее 70	500	4,0	1,5
				Менее 70	400	3,5	1,2
– высокой точности	От 0,30 до 0,50	Б	1 2	Не менее 70	300	3,0	1,0
				Менее 70	200	2,5	0,7
– средней точности	Более 0,50	В	1 2	Не менее 70	150	2,0	0,5
				Менее 70	100	2,0	0,5
Обзор окружающего пространства при очень кратковременном, эпизодическом различении объектов:							
– при высокой насыщенности помещений светом	Независимо от размера объекта различения	Г	–	Независимо от продолжительности зрительной работы	300	3,0	1,0
– при нормальной насыщенности помещений светом		Д	–		200	2,5	0,7
– при низкой насыщенности помещений светом	Независимо от размера объекта различения	Е	–	Независимо от продолжительности зрительной работы	150	2,0	0,5

Окончание табл. 84

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Относительная производительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность	Искусственное освещение на рабочей поверхности от системы общего освещения, лк	Естественное освещение	
						КЕО $e_n$ , % при освещении	
						верхнем или боковом	боковом
Общая ориентировка в пространстве интерьера:							
– при большом скоплении людей	Независимо от размера объекта различения	Ж	1,0	Независимо от продолжительности зрительной работы	75	Не регламентируется	Не регламентируется
– при малом скоплении людей			2,0		50		
Общая ориентировка в зонах передвижения:							
– при большом скоплении людей	Независимо от размера объекта различения	3	1,0	Независимо от продолжительности зрительной работы	30	Не регламентируется	Не регламентируется
– при малом скоплении людей			2,0		20		

Таблица 85. Значения коэффициента запаса

Производственные помещения	Пример помещений	Искусственное освещение			Естественное освещение	
		Коэффициент запаса $K_3^*$				
		Эксплуатационная группа ОП			Угол наклона светопропускающего материала к горизонту, °	
		1 – 4	5 – 6	7	0 – 15	76 – 90
1. Помещения с содержанием в воздухе рабочей зоны: а) свыше 5 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	Агломерационные фабрики, цементные заводы и обрубные отделения литейных цехов	$\frac{2,0}{18}$	$\frac{1,7}{6}$	$\frac{1,6}{4}$	$\frac{2,0}{4}$	$\frac{1,5}{4}$
б) более 1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма, копоти	Цехи кузнечные, литейные, мартеновские, сборного железобетона	$\frac{1,8}{6}$	$\frac{1,6}{4}$	$\frac{1,6}{2}$	$\frac{1,8}{3}$	$\frac{1,4}{3}$
в) менее 1 мг/м <sup>3</sup> пыли, дыма	Цехи инструментальные, сборочные, механические	$\frac{1,5}{4}$	$\frac{1,4}{2}$	$\frac{1,4}{1}$	$\frac{1,6}{2}$	$\frac{1,3}{2}$
г) значительные концентрации паров, кислот, щелочей, газов	Цехи химических заводов по выработке кислот, щелочей, едких химических реактивов, удобрений, цехи гальванических покрытий и различных отраслей промышленности с применением электролиза	$\frac{1,8}{6}$	$\frac{1,6}{4}$	$\frac{1,6}{2}$	$\frac{2,0}{3}$	$\frac{1,5}{3}$
2. Производственные помещения с особым режимом по чистоте воздуха при обслуживании светильников	Радиоэлектронная промышленность	$\frac{1,4}{2}$	–	–	–	–

Производственные помещения	Пример помещений	Искусственное освещение			Естественное освещение	
		Коэффициент запаса $K_3^*$				
		Эксплуатационная группа ОП			Угол наклона светопропускающего материала к горизонту, °	
		1 – 4	5 – 6	7	0 – 15	76 – 90
3. Помещения общественных и жилых зданий	Кабинеты и рабочие помещения, жилые комнаты, учебные помещения, лаборатории, читальные залы, залы совещаний, торговые залы и т. д.	$\frac{1,4}{2}$	$\frac{1,4}{1}$	$\frac{1,4}{1}$	$\frac{1,5}{2}$	$\frac{1,2}{1}$

\* В числителе указаны значения коэффициента запаса  $K_3$ , в знаменателе – количество чисток светильников в год для искусственного освещения и количество светопропускающего материала в год для естественного освещения

Таблица 86. Рекомендуемые источники света

Характеристика зрительной работы по требованиям к цветоразличению	Освещенность при системе комбинированного освещения, лк	Примерные типы источников света для освещения	
		общего	местного
При системе общего освещения			
Различение цветных объектов при невысоких требованиях к цветоразличению (сборка радиоаппаратуры, намотка проводов и т. п.)	500 и более	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ	
	300, 400	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ, НЛВД+М	
	150, 200	ГЛ ЛБ, (ЛХБ)	
	Менее 150	НЛВД+МГЛ, ДРЛ, ЛБ, ДРЛ, НЛВД+МГЛ	
Требования к цветоразличению отсутствуют (механическая обработка металлов, пластмасс, сборка машин и инструментов и т. п.)	500 и более	(ЛН, КГ) ЛБ, (ЛХБ), МГЛ	
	300, 400	(ДРЛ) ЛБ, (ЛХБ)	
	150, 200	МГЛ, (ДРЛ) НЛВД+МГЛ	

Характеристика зрительной работы по требованиям к цветоразличению	Освещенность при системе комбинированного освещения, лк	Примерные типы источников света для освещения	
		общего	местного
При системе общего освещения			
Требования к цветоразличению отсутствуют (механическая обработка металлов, пластмасс, сборка машин и инструментов и т. п.)	Менее 150	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ, (ДРЛ), НЛВД+МГЛ, НЛВД+ДРЛ, НЛВД (ЛН, КГ)	–
При системе комбинированного освещения			
Различение цветных объектов при невысоких требованиях к цветоразличению (сборка радиоаппаратуры, намотка проводов и т. п.)	500	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ, НЛВД+МГЛ	ЛБ, (ЛХБ)
	300, 400	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ, (ДРЛ), НЛВД+МГЛ	ЛБ, (ЛХБ)
	150, 200	ЛБ, (ЛХБ), НЛВД+МГЛ, МГЛ, (ДРЛ)	ЛБ, (ЛХБ)
Требования к цветоразличению отсутствуют (механическая обработка металлов, пластмасс, сборка машин и инструментов и т. п.)	500	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ, НЛВД+МГЛ	ЛБ, (ЛХБ)
	300, 400	ЛБ, (ЛХБ), МГЛ, (ДРЛ), НЛВД+МГЛ	ЛБ, (ЛХБ)
	150, 200	ЛБ, (ЛХБ), НЛВД, МГЛ, (ДРЛ)	ЛБ, (ЛХБ)

*Примечания:*

1. В скобках указаны энергетически менее эффективные источники света.
2. ЛБ – люминесцентные лампы белого цвета; ЛХБ – холодного белого цвета; МГЛ – металлогенные лампы; НЛВД – натриевые лампы высокого давления; ДРЛ – дуговые ртутные лампы; КГ – кварцевые галогенные источники

Таблица 87. Рекомендуемые источники света для общего освещения жилых и общественных зданий

Требования к освещению	Характеристика зрительной работы по требованию к цветоразличению	Освещенность, лк	Примерные типы и источники света
Обеспечение зрительного комфорта в помещениях при выполнении зрительных работ А-В разрядов	Сопоставление цветов с высокими требованиями к цветоразличению (кабинеты рисования, химические лаборатории, выставочные залы)	От 300 до 500 От 150 до 300	ЛБЦТ, (ЛЕЦ, ЛХЭ) ЛБЦТ, (ЛЕЦ)
	Различение цветных объектов при невысоких требованиях к цветоразличению	От 300 до 500	ЛБ, ЛБЦТ, МГЛ, (ЛХБ, ЛЕЦ)
	Требования к цветоразличению отсутствуют (кабинеты, прочие комнаты, конструкторские, чертежные бюро, читальные каталоги, архивы, книгохранилища)	От 150 до 300 От 300 до 500 От 150 до 300 Менее 150	ЛБ, ЛБЦТ, МГЛ, (ЛХБ, ДРЛ) ЛБ, МГЛ, (ЛХБ, ЛЕЦ) ЛБ, МГЛ, (ЛХБ) ЛБ, МГЛ
Обеспечение психоэмоционального комфорта в помещениях с разрядами зрительных работ Г-Ж	Различение цветных объектов при невысоких требованиях к цветоразличению (концертные, актовые залы, зрительные залы театров, клубов, вестибюли) и т. п.	От 300 до 500 От 150 до 300	ЛБЦТ, КЛТБЦ, (ЛЕЦ) ЛБ, ЛБЦТ, КЛБЦТ, ЛХБ, ЛЕХ, ЛБ, МГЛ+НЛВД
	Требования к цветоразличению отсутствуют (зрительные залы кинотеатров, лифтовые холлы, коридоры, переходы)	Менее 150	ЛБ (ГЛН, ЛН, ДРЛ)
Обеспечение зрительного и психоэмоционального комфорта в помещениях жилых зданий	Различение цветных объектов при невысоких требованиях к цветоразличению (жилые комнаты, кухни, прихожие, ванные комнаты)	100 50	КЛТБЦ, ЛТБЦЦ*, ЛЕЦ, ЛБ*, (ГЛН, ЛН) КЛТБЦ, ЛТБЦЦ*, ЛЕЦ*, ЛБ*, (ГЛН, ЛН)
	Требования к цветоразличению отсутствуют (лестничные клетки, лифтовые холлы, вестибюли)	Менее 100	ЛБ

\* Рекомендуются трубчатые маломощные, фигурные (U-образные и кольцевые) и компактные люминесцентные лампы

Таблица 88. Технические данные люминесцентных ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Длина, мм	Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Длина, мм
ЛД15-4	15	590	451,6	ЛД80-4	80	4070	1514,2
ЛБ15-4		760		ЛБ80-4		5220	
ЛД20-4	20	920	604,0	ЛБР4	4	100	140
ЛБ20-4		1180		ЛБР4-2		110	
ЛД30-4	30	1640	908,8	ЛХБ-150	150	8000	1524,2
ЛБ30-4		2100					
ЛД40-4	40	2340	1213,6	ЛБР80-1	80	41,60	1514,2
ЛБ40-4		3120					
ЛД65-4	65	3570	1514,2				
ЛБ65-4		4650					

Таблица 89. Технические данные ламп накаливания общего назначения

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм
В220-25	25	220	Г220-200	200	2800
БК220-40	40	460	Г220-500	500	8300
Б220-60	60	715	Г220-750	750	13100
Б220-100	100	1350	Г220-1000	1000	18600
Г220-150	150	2000	Г220-1500	1500	29000

*Примечание:* в обозначении типа лампы В – вакуумные; Г – газонаполненные; Б – биспиральные; БК – биспиральные-криптоновые.

Таблица 90. Технические данные U, W-образных и кольцевых ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Длина, мм	Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Длина, мм
ЛБУ20	20	800	322	ЛДЦW30	30	1000	230
ЛБУ30	30	1680	465	ЛБК20	20	820	236
ЛБУ40	40	2360	626	ЛБК40	40	2200	142
ЛБУ80	80	3680	776	ЛБК22	22	850	216
ЛБW30	30	1400	230	ЛБК32	32	1500	311

Таблица 91. Технические данные кварцевых галогенных ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм
КГ220-1000-5	1000	22000	КГ220-2000-4	2000	44000
КГ220-1500	1500	33000	КГ220-5000-1	5000	110000

Таблица 92. Осветительные приборы для промышленных зданий

Тип осветительного прибора	Мощность и количество источников света	Тип кривой силы света	Класс светораспределения	Степень защиты	Длина осветительного прибора, мм
С люминесцентными лампами					
ПВЛМ	1 × 40, 1 × 80	Д	Н, П	5'3	1325
	2 × 40, 2 × 80				
ЛСП 22	1 × 65, 2 × 65	Д	Н, П	5'3	1625
ЛСП 02	2 × 36	Д, спец.	П	IP 20	1240
	2 × 58				1540

Окончание табл. 92

Тип осветительного прибора	Мощность и количество источников света	Тип кривой силы света	Класс светораспределения	Степень защиты	Длина осветительного прибора, мм
С люминесцентными лампами					
ЛСП 18	1 × 18	М	Н	1365	720
	1 × 36, 1 × 40			5'4	1330
	1 × 58, 1 × 65				1348
	2 × 36	Специальная	Р	1630	1315
ЛСП 24	2 × 20	Специальная	Р	5'4	695
	2 × 40, 2 × 65				1300
					1600
ЛСП 06	2 × 80	М	Р	IP 20	1538
ЛСП 04	1 × 40, 1 × 65	Г	Р	Полностью пыленепроницаемые	1260
		Д			
ЛСП 1	1 × 18	М	Р	IP 64	660
	1 × 36, 1 × 58				1270
					1570
ДСП 2	2 × 18	М	Р	IP 64	660
	2 × 36, 2 × 58				1270
					1570
ЛСП 01	2 × 80, 2 × 150	Г	Р	IP 64	1536

Таблица 93. Осветительные приборы для промышленных зданий с лампами типа ДРЛ

Тип осветительного прибора	Мощность и количество источников света	Тип кривой силы света	Класс светораспределения	Степень защиты
С лампами ДРЛ				
РСП 05	125, 250, 400, 700, 1000	Г	П	IP 20 5'3
РСП 20	250, 400, 700	Д	Д	IP 20
РСП 11	400	М	Н	IP 52
РСП 20	250	–	–	IP 52
РСП 02	125	М	Н	IP 54
С лампами типа ДРИ				
ГСП 17	700	К	П	IP 20
	2000	Г		IP 23
ГПП 01	125	Д		IP 54
С лампами ДНаТ				
ЖСП 01	400	Г	П	IP 23
ЖПП 01	70, 100	Д		IP 54

Таблица 94. Светильники с лампами накаливания для производственных помещений

Тип светильника	Мощность, Вт	Защитный угол, °	Примечание	Тип светильника	Мощность, Вт	Защитный угол, °	Примечание
НСП 07	200 500	25	Частично пылезащищенное, незащищенное, кривая силы света – Л	УПМ-15 У-15	500	15	Частично пылезащищенное, незащищенное, кривая силы света – Д
НСП 03	100 60	–	Полностью пыленепроницаемое	УП-24	500	15	Полностью пыленепроницаемое
Астра – 1;11; Астра – 3;12; Астра –32	100 200	30 15	Типы 11, 12 – частично пылезащищенные; 1, 3, 32 – незащищенные. Кривая силы света – Д	С-200М	200	30	Незащищенное
				С-500	500		
				СУ-200М СУ-500М	200 500	30	Частично пылезащищенное
				НСП 17	200 500 1000	–	Степень защиты IP 20/50
УПД-500 УПД-1000 УПД-1500	500 1000 1500	30	Частично пыленепроницаемое	НСП 20	500	–	Для высоких помещений с нормальными условиями среды
ППД2-500	500	30	Полностью пыленепроницаемое	ИСП 22	500	–	
ППД-100 ППД-200 ППД-500	100 200 500	15					

Таблица 95. Осветительные приборы для общественных зданий

Тип осветительного прибора	Мощность и количество ИС	Тип КСС	Класс светораспределения	Степень защиты	Длина осветительного прибора, мм
С люминесцентными лампами					
ЛББ 58	1 × 20	Д	П	IP 20	660
	1 × 40				1270
ЛП 046	2 × 20	Д	П	IP 20	645
	2 × 40				1256
С лампами накаливания					
НВ 005, встраиваемые в ниши подвесных потолков	100	Г	П	IP 20	–
	150				
«Селена» для вспомогательных, хозяйственных помещений с нормальными условиями	60	Г	П	IP 44	–
	100				
С лампами ДРЛ					
РСП 46	250, 400	Д	П	IP 20	–

Таблица 96. Группы административных районов по ресурсам светового климата

Номер группы	Административный район
1	Московская, Смоленская, Владимирская, Калужская, Тульская, Рязанская, Нижегородская, Свердловская, Пермская, Челябинская, Курганская, Новосибирская, Кемеровская области, Республика Мордовия, Чувашская республика, Удмуртская Республика, Республика Башкортостан, Республика Калмыкия – Хальмг Тангч, Красноярский край (севернее 63° с.ш.), Республика Саха (Якутия) (севернее 63° с.ш.), Чукотский автономный округ, Хабаровский край
2	Брянская, Курская, Орловская, Белгородская, Воронежская, Липетская, Тамбовская, Пензенская, Самарская, Ульяновская, Оренбургская, Саратовская, Волгоградская области, Республика Коми, Кабардино-Балкарская Республика, Республика Северная Осетия, Чеченская, Ингушская Республики, Ханты-Мансийский автономный округ, Алтайский край, Красноярский край (южнее 63° с.ш.), Республика Саха (Якутия) (южнее 63° с.ш.), Республика Тыва, Республика Бурятия, Читинская область
3	Калининградская, Псковская, Новгородская, Тверская, Ярославская, Ивановская, Ленинградская, Вологодская, Костромская, Кировская области, Карельская Республика, Ямало-Ненецкий автономный округ, Таймырский (Долгано-Ненецкий) автономный округ
4	Архангельская, Мурманская области
5	Калмыцкая Республика, Ростовская, Астраханская области, Ставропольский край, Республика Дагестан, Амурская область, Приморский край

*Таблица 97. Распределение люминесцентных светильников на группы с усредненными светотехническими характеристиками*

Характеристика светильников	Светильники, относящиеся к данной группе, или отдельные светильники	Условный номер группы
Подвесные диффузные светильники для производственных помещений без стекла (включая пылеводозащищенные с отражателями):	ПВЛМ-Д; ЛД; ЛСП 06 (05) ЛСП 02 (04; 05; 06; 34-36)	1
– без перфорации и решетки		
– с перфорацией без решетки	ПВЛМ-ДО; ЛДО; ЛСП 06 (13) ЛСП 02 (01; 02; 03; 31-33)	2
– без перфорации с решеткой	ПВЛМ-ДР; ЛДР; ЛСП 06 (07) ЛСП 02 (10; 11; 12; 16-18; 40-42; 46-48)	3
– с перфорацией и решеткой	ПВЛМ-ДОР; ЛДОР; ЛСП 06 (15) ЛСП 02 (07; 08; 09; 13-15; 37-39; 43-45)	4
Подвесные пылеводозащищенные светильники с обычными лампами с рассеивающим стеклом	ПВЛ1; ПВЛП	5
Подвесные взрывозащищенные светильники с отражателем	НОГЛ; НОДЛ	6
Подвесные светильники рассеянного света с решетками	ЛСО 02 (01; 02; 03)	7
Встроенные и потолочные светильники, не имеющие излучения в верхней полусфере с рассеивателями	УСП3; УСП5; УСП11; УСП18; УСП31; УСП35 (все двухламповые)	12
	УСП3; УСП5; УСП11; УСП18; УСП31; УСП35 (все четырех- и шестиламповые); Л201; Б440-18	13

Окончание табл. 97

Характеристика светильников	Светильники, относящиеся к данной группе, или отдельные светильники	Условный номер группы
Встроенные и потолочные светильники с зеркальными отражателями с решеткой	ЛВО 13 (01); ВПО 13 (01)	22
	УВЛН 6; УВЛВ 6	–
Подвесные с зеркальными отражателями:		
– с решеткой	ЛСП 01-2 × 80 (01) ЛСП 01-2 × 150 (09)	23
	ЛСП 01-2 × 150 (13)	–
– с решеткой и перфорацией	ЛСП 01-2 × 80 (03) ЛСП 01-2 × 150 (11)	24
	ЛСП 01-2 × 150 (15)	–
– с перфорацией без решетки	ЛСП 01-2 × 80 (04) ЛСП 01-2 × 150 (12)	25

Примечание: в скобках указаны модификации

Таблица 98. Эксплуатационные группы светильников

Конструктивно-светотехнические схемы светильников		I			II			III			IV		V		VI		VII
С лампами накаливания	A																
	Б1																
С люминесцентными лампами	Б2																
	Б2																
Группа твердости светотехнических материалов (покрытий)		Т	СТ	М	Т	СТ	М	Т	СТ	М	Т	СТ	Т	СТ	Т	СТ	Т
Эксплуатационная группа светильников		5	4	3	6	5	4	2	2	1	7	6	5	4	6	5	7
Примеры типов осветительных приборов	с ЛН, ДРЛ	УПМ УПС НСП	РСР ЖСП С	СД РСР	УПД	РСР НСР СО	-	НСР У15	-	-	ГСР РСР ЖСП УП24	-	ППД НСР ВЗГ РСР	-	ППД НСР ВЗГ РСР	-	ОСР ДРИЗ
	с ЛЛ	-	ЛВП ОВЛ	ЛД ПВЛМ ЛСП	-	ЛСО УСП	ЛДО ШОД	-	ЛПО ЛСО	МЛ ЛНЛ	ЛСП	ПВЛ ЛВП ВЛВ	-	НОГД НОДЛ	-	НОГЛ НОДЛ РВЛМ	ПВЛМ

## Контрольные вопросы

1. Что обеспечивает правильно организованное освещение производственных помещений?
2. Сколько процентов получаемой человеком информации приходится на органы зрения?
3. Какими показателями характеризуется освещение?
4. Какие показатели освещения относятся к количественным?
5. Какие показатели освещения относятся к качественным?
6. Раскройте понятие «световой поток». В каких единицах он измеряется?
7. Что представляет собой сила света и в каких единицах она измеряется?
8. Охарактеризуйте понятие «освещенность». В каких единицах она измеряется?
9. Дайте определение яркости. В каких единицах она измеряется?
10. Раскройте понятие «фон». Какими параметрами он характеризуется?
11. Что представляет собой коэффициент отражения?
12. Охарактеризуйте понятие контраста объекта с фоном.
13. Как определяется коэффициент пульсации освещенности?
14. Какие виды производственного освещения существуют?
15. Чем создается естественное освещение?
16. Чем создается искусственное освещение?
17. Из чего состоит совмещенное освещение?
18. Какие бывают виды естественного освещения?
19. Какие бывают виды искусственного освещения?
20. Какими параметрами характеризуются источники искусственного освещения?
21. Из чего состоит электрический светильник?
22. В каких случаях применяют метод коэффициента использования светового потока?
23. В каких случаях применяют точечный метод расчета освещения?
24. Каким нормативным документом регламентируется освещение?
25. Какие виды ламп существуют?
26. Как определяется КЕО?

## Глава 6. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ОПАСНОСТИ И ВРЕДНОСТИ, ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ

Опасности и вредности являются центральными понятиями в науке о безопасности труда.

Опасность (производственная) – свойство производственной среды обитания, которое при определенных условиях может причинять ущерб человеку, материальным ценностям, природной среде.

Опасности носят потенциальный, т. е. скрытый характер. Очень важно своевременное обнаружение и установление количественных, временных и пространственных характеристик опасностей (идентификация) и проведение необходимых профилактических мероприятий, защищающих человека.

Следует отметить, что в последние годы значительно больше внимания уделяется вопросам разработки и реализации профилактических мероприятий по предупреждению производственного травматизма и совершенствованию системы управления охраной труда. Актуальными становятся вопросы идентификации опасностей, прогнозирование и количественная оценка риска.

### 6.1. Анализ травматизма и количественные характеристики риска

В настоящее время наиболее распространенным методом анализа следует считать анализ условий труда безопасности по некоторым статистическим критериям, называемым коэффициентами травматизма. На практике чаще всего используют коэффициент частоты и коэффициент тяжести травматизма. Коэффициент частоты травматизма определяется соотношением

$$K_{\text{ч}} = (П/С)1000, \quad (310)$$

где П – число пострадавших за некоторый период времени;

С – средний списочный состав за этот же период (чел.).

Коэффициент частоты  $K_{\text{ч}}$  можно рассчитывать как по общему числу несчастных случаев, так и по отдельным их группам. Например, можно рассчитать коэффициент частоты легких, тяжелых и смертельных несчастных случаев, коэффициент частоты от падения с высоты, поражения электрическим током и т. д.

Этот коэффициент можно рассчитать не только по численному составу работающих, но и по некоторым производственным показателям, пропорциональным численности трудящихся. Например, коэффициент частоты можно определить, отнеся число пострадавших к количеству произведенной продукции

$$K_{\text{ч}} = (П/Д)1000, \quad (311)$$

где Д – количество произведенной продукции в тысячах штук. Коэффициент частоты не учитывает тяжести несчастных случаев.

## 6.2. Коэффициент тяжести травматизма

Коэффициент тяжести травматизма характеризует среднюю тяжесть несчастных случаев за некоторый период времени по числу дней потери трудоспособности пострадавших. Его рассчитывают по формуле

$$K_{\text{т}} = (Н/С)1000 \quad (312)$$

$$\text{или } K_{\text{т}} = (Н/П), \quad (313)$$

где Н – общее число дней нетрудоспособности всех пострадавших за данный период времени;

$K_{\text{т}}$  – по формуле (312) характеризует среднее число дней нетрудоспособности из-за травматизма, приходящегося на 1000 трудящихся (дн/1000 чел.);

$K_{\text{т}}$  – по формуле (313) характеризует среднее число дней нетрудоспособности одного пострадавшего (дн/чел.).

$K_{\text{т}}$  не учитывает смертельных несчастных случаев.

## 6.3. Качественные и количественные характеристики риска

Современный мир отверг концепцию абсолютной безопасности и пришел к концепции приемлемого (допустимого) риска, суть которой – в стремлении к такой безопасности, которую приемлет в данный период общество в соответствии со своими экономическими возможностями. Количественная характеристика риска

$$R = N/C, \quad (314)$$

где N – число смертельных случаев в год;

C – средний списочный состав работавших или принимавших участие в данном процессе.

Ожидаемый (прогнозируемый) риск представляет собой произведение коэффициента частоты несчастного случая ( $K_{\text{ч}}$ ), деленного на 1000 и на произведение вероятностей нахождения работника в зоне риска

$$R = K_{\text{ч}}/1000 \cdot P_i, \quad (315)$$

где  $P_i = P_1 P_2 P_3 \dots P_n$ , здесь  $P_1$ , – вероятность нахождения работника на производстве в течение года (отношение числа рабочих дней в году к общему числу дней в году);

$P_2$  – вероятность работы человека на производстве в течение недели (отношение числа рабочих дней в неделе к числу дней недели);

$P_3$  – вероятность выполнения работником технологического задания непосредственно на оборудовании, для которого рассчитывается коэффициент риска (отношение времени выполнения задания к продолжительности рабочей смены) и т. д.

**Пример.** Определить коэффициент риска  $R$  гибели человека на конкретном производстве, если среднестатистически погибает один человек в десять лет, а списочный состав 90 тыс. человек.

$$R = N/C = 1/(90000 \cdot 10) = 1,1 \cdot 10^{-6}.$$

Одна из возможных форм качественной оценки риска различных видов и человеческой деятельности приведена в табл. 99.

*Таблица 99.* Одна из возможных форм качественной оценки риска различных видов и человеческой деятельности

Не наблюдаемый пострадавшими риск замедленного действия	Наблюдаемый пострадавшими риск быстрого действия
Антибиотики Этилированный бензин Прививки Курение	Авиaperезовки Железнодорожные аварии Автокатастрофы Асбест Радиоактивные отходы
Низкий риск, легко ограничиваемый для будущих поколений	Очень высокий риск, трудно ограничиваемый для будущих поколений

#### 6.4. Показатель опасности

Показатель опасности [чел./ (чел.-смен/тыс. т)] определяется как отношение числа несчастных случаев к трудоемкости работ

$$P_{оп} = P/T, \quad (316)$$

где  $P$  – число пострадавших за рассматриваемый период времени;

$T$  – трудоемкость работ, чел.-смен / тыс. т.

Коэффициент опасности данного производства определяется по формуле

$$K_0 = (P_{пр}/P)/(T_{пр}/T), \quad (317)$$

где  $P_{пр}$  – число несчастных случаев при исследуемом технологическом процессе, чел.;

$P$  – общее число несчастных случаев на предприятии, чел.;

$T_{пр}$  – трудоемкость исследуемого процесса, чел.-смен / тыс. т;

$T$  – трудоемкость работ на объекте, чел.-смен / тыс. т.

$K_0$  характеризует степень опасности данного производственного процесса относительно некоторой средней опасности объекта.

#### 6.5. Коэффициент насыщенности механизмами производственной площади

Коэффициент насыщенности механизмами производственной площади определяется по формуле

$$K_m = S_m/S, \quad (318)$$

где  $S_m$  – площадь, занимаемая механизмами, м<sup>2</sup>;

$S$  – общая производственная площадь, м<sup>2</sup>.

Коэффициент насыщенности характеризует степень насыщенности объекта машинами и механизмами и уровень механизации производства, а также загроможденность производственной площади. Этот коэффициент можно использовать как показатель степени безопасности на объекте.

Анализ динамики (изменения во времени) травматизма производится путем определения коэффициентов травматизма за последовательные промежутки времени (по годам) и сопоставления их значений. Увеличение во времени  $K_ч$ ,  $K_т$ ,  $P_{оп}$ ,  $K_0$  означает, что производство становится более опасным.

Количественные зависимости между показателями травматизма и определяющими травматизм факторами определяются при помощи корреляционного анализа.

### **6.6. Определение опасных зон и работ с повышенной опасностью**

1. Работы повышенной опасности следует выполнять при наличии наряда-допуска и после проведения целевого инструктажа непосредственно на рабочем месте.

2. К работам повышенной опасности относятся работы, при выполнении которых имеется или может возникнуть производственная опасность вне связи с характером выполняемой работы. При производстве указанных работ, кроме обычных мер безопасности, необходимо выполнение дополнительных мероприятий, разрабатываемых отдельно для каждой конкретной производственной операции.

3. В каждой организации на основе Примерного перечня работ повышенной опасности с учетом конкретных условий и особенностей технологии должен быть составлен и утвержден руководителем организации (главный инженер, технический директор и т. п.) свой перечень работ повышенной опасности.

4. Перед началом работ на территории действующего предприятия (цеха, объекта, производства и т. д.) заказчик и подрядчик обязаны оформить акт-допуск. Ответственность за выполнение мероприятий, обеспечивающих безопасность работ и предусмотренных актом-допуском, несут руководители организации и действующего предприятия. Руководитель действующего предприятия несет ответственность за возникновение производственной опасности, не связанной с характером работ, выполняемых подрядчиком (допуск в опасную зону, подачу напряжения, горячей воды, пара и т. д.). Руководитель подрядной организации отвечает за организацию и безопасное производство выполняемой им работы.

5. При организации работы (размещение участков работ, рабочих мест, проездов для строительных машин и транспортных средств, проходов, санитарно-бытовых помещений и т. п.) следует установить опасные для людей зоны, в пределах которых постоянно действуют или могут возникнуть опасные и вредные производственные факторы.

6. К зонам постоянно действующих опасных производственных факторов должны быть отнесены рабочие места, проходы и проезды к ним, находящиеся:

а) вблизи неизолированных токоведущих частей электроустановок;

б) ближе 2 м от неогражденных перепадов по высоте на 1,3 м и более;

в) в местах, где содержатся вредные или опасные вещества в концентрации выше ПДК или присутствуют опасные и вредные физические факторы с параметрами выше предельно допустимых уровней.

7. К зонам потенциально опасных производственных факторов следует относить неогражденные и незащищенные:

а) участки территорий вблизи строящегося здания (сооружения);

б) этажи (ярусы) зданий и сооружений в одной захватке, над которыми производятся работы (монтаж, демонтаж, ремонт конструкций или технологического оборудования или их частей, узлов, деталей, рабочих органов);

в) зоны, над которыми происходит перемещение грузов грузоподъемными кранами;

г) зоны расположения оборудования с ядовитыми, агрессивными, легковоспламеняющимися, радиоактивными, взрывчатыми опасными веществами, а также иные зоны, где персонал подрядчика может попасть под воздействие опасных и вредных факторов.

8. До начала работ в опасных зонах следует осуществлять организационно-технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работающих, а работы выполнять только по наряду-допуску подрядчика.

9. Во избежание доступа лиц, не связанных с выполнением работ в опасных зонах, до начала работы необходимо устанавливать защитные или сигнальные ограждения в соответствии с требованиями [29]. Порядок установки ограждений при выполнении работ на территории действующего предприятия определяется актом-допуском.

10. Выполнение работ в опасных зонах допускается только при наличии ППР или технологических карт (ТК), конкретных решений по защите работающих от воздействия опасных и вредных факторов.

11. Границы опасных зон, в пределах которых возможно возникновение опасности в связи с падением предметов, устанавливаются согласно табл. 100.

Таблица 100. Границы опасных зон при возможном падении грузов

Высота возможного падения груза (предмета), м	Минимальное расстояние отлета, м	
	от проекции перемещаемого краном груза в случае его падения	предметов в случае их падения со здания, сооружения
До 10	4	3,5
20	7	5
70	10	7
120	15	10
200	20	15
300	25	20
450	30	25

*Примечание.* При промежуточных значениях высоты возможного падения груза (предметов) минимальное расстояние их отсчета допускается методом интерполяции.

12. Границы опасных зон, в пределах которых существует опасность поражения людей электрическим током, определяется по табл. 101.

Таблица 101. Границы опасных зон при возможном поражении электрическим током

Напряжение электроустановок, кВ	Расстояние, ограничивающее опасную зону от неограждаемых незаизолированных частей электроустановок (электрооборудования, кабеля, провода и т. д.) или от вертикальной плоскости, образуемой проекцией на землю ближайшего провода ВЛЭП, находящейся под напряжением, м
До 1	1,5
От 1 до 20	2,0
От 35 до 110	4,0
От 150 до 220	5,0
330	6,0
От 500 до 750	9,0
800 (пост. ток)	9,0

13. Величины ПДК некоторых вредных веществ в воздухе рабочей зоны, превышение которых создает опасность для здоровья человека, приведены в табл. 102.

Таблица 102. Величины ПДК некоторых вредных веществ

Наименование вещества (пары, газы)	ПДК по [8], мг/м <sup>3</sup>	Примеры участков (зон), где при выполнении работ возможно наличие вредных веществ
Ацетилен (по фосфорному водороду)	0,1	На участках выполнения анти-коррозионных работ, малярных, шпаклевочных работ, а также сварки металлических, полимерных материалов и конструкций
Дибутил эфир	0,5	
Хлор	1,0	
Толуол	50,0	
Ксилол	50,0	
Ацетон	200,0	
Сероводород	10,0	На участках выполнения земляных работ (подземных в заболоченных местах), а также в канализационных колодцах и на участках выполнения работ с применением фенольных смол
Аммиак	20,0	
Метан (при пересчете на углерод)	300,0	
Окислы азота (в пересчете на NO)	5,0	На участках выполнения анти-коррозионных, изоляционных и сварочных работ, а также в местах полного сгорания топлива
Сернистый ангидрид	10,0	
Окись углерода	20,0	
Углеводороды нефти: керосин, уайт-спирит, бензин, топливо ТС-1, топливо ТС-2 (при пересчете на углерод)	300,0	

14. Границы опасных зон вблизи движущихся частей машин и оборудования определяются в пределах 5 м, если другие повышенные требования отсутствуют в паспорте или инструкции завода-изготовителя.

15. Если в ППР (ТК) границы опасных зон не указаны, их определяют до начала работ лица, ответственные за организацию и проведение работ на объекте.

16. К самостоятельному выполнению работ повышенной опасности допускаются лица:

- не моложе 18 лет;
- признанные годными к их производству медицинским освидетельствованием;

- имеющие производственный стаж на указанных работах не менее одного года и тарифный разряд не ниже третьего;
- прошедшие обучение и проверку знаний правил, норм и инструкций по охране труда;
- имеющие удостоверение на право производства этих работ;
- получившие инструктаж на рабочем месте по безопасности при выполнении работ.

Проведение первичного инструктажа на рабочем месте, повторного и внепланового фиксируется в журнале регистрации инструктажей, а цель инструктажа – в наряде-допуске. Рабочие, впервые допускаемые к работам повышенной опасности, в течение одного года должны выполнять такие работы под непосредственным надзором опытных рабочих, назначенных для этого приказом по организации.

#### **6.7. Примерный перечень мест (условий) производства и видов работ, на выполнение которых необходимо выдавать наряд-допуск**

1. Производство работ с применением грузоподъемных кранов и других строительных машин в охранных зонах воздушных линий электропередачи, газонефтепроводов, складов легковоспламеняющихся или горючих жидкостей, горючих или сжиженных газов.

2. Выполнение любых работ в колодцах, шурфах, замкнутых и труднодоступных пространствах.

3. Выполнение земляных работ на участках с патогенным заражением почвы (свалки, скотомогильники и т. п.), в охранных зонах подземных электрических сетей, газопровода и других опасных подземных коммуникаций.

4. Осуществление текущего ремонта, демонтажа оборудования, а также производство ремонтных или каких-либо строительно-монтажных работ при наличии опасных факторов действующего предприятия.

5. Выполнение работ на участках, где имеется или может возникнуть опасность со смежных участков работ.

6. Производство работ в непосредственной близости от полотна или проезжей части эксплуатируемых автомобильных и железных

дорог (определяется с учетом действующих нормативных документов по безопасности труда соответствующих министерств и ведомств).

7. Выполнение газоопасных работ.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое производственная опасность?
2. Какой характер носят опасности?
3. Раскройте понятие «травматизм». Какими количественными характеристиками он определяется?
4. Что такое коэффициент частоты травматизма и как он определяется?
5. Охарактеризуйте коэффициент тяжести травматизма и скажите, как он определяется.
6. Что такое риск?
7. Что является количественной характеристикой риска?
8. Как определяется ожидаемый риск?
9. Что такое показатель опасности и как он определяется?
10. Как определяется коэффициент насыщенности механизмами производственной площади?
11. Какие работы относятся к работам повышенной опасности?
12. Перечислите группы видов работ, на выполнение которых необходимо выдавать наряд-допуск.
13. Что такое опасный фактор?
14. Что такое вредный фактор?

## **Глава 7. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАСШТАБОВ ЗАРАЖЕНИЯ СИЛЬНОДЕЙСТВУЮЩИМИ ЯДОВИТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ ПРИ АВАРИЯХ (РАЗРУШЕНИЯХ) НА ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ И ТРАНСПОРТЕ**

### **7.1. Общие положения**

Промышленные предприятия, транспорт, различные продуктопроводы и хранилища, где сосредоточены запасы сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ), представляют повышенную опасность для человека и среды его обитания. В результате аварий, катастроф и стихийных бедствий они становятся источниками выбросов СДЯВ в атмосферу, что вызывает опасность массового поражения людей и животных.

Методика прогнозирования масштабов заражения позволяет осуществлять прогнозирование масштабов зон заражения как заблаговременно, так и непосредственно после аварии и может быть использована для оценки опасности объектов народного хозяйства, разработки мероприятий по защите рабочих, служащих и населения от СДЯВ и принятия оперативных решений по мерам защиты на случай чрезвычайной ситуации.

Прогнозирование масштабов зон заражения на случай выбросов СДЯВ в окружающую среду проводится по следующим показателям:

- глубина зоны заражения СДЯВ;
- площадь зоны заражения СДЯВ;
- время подхода зараженного воздуха к жилым районам, населенным пунктам и другим объектам;
- время поражающего действия СДЯВ.

#### **Термины и определения:**

1. **Сильнодействующее ядовитое вещество** – это химическое вещество с поражающими концентрациями, применяемое в народном хозяйстве, которое при разливе или выбросе может приводить к заражению воздуха.

2. **Зона заражения СДЯВ** – территория, зараженная СДЯВ в опасных для жизни людей пределах. Она включает участок разлива (выброса) СДЯВ и территорию, над которой распространились пары этих веществ в поражающих концентрациях.

3. **Авария** – нарушение технологических процессов на производстве, повреждение трубопроводов, емкостей, хранилищ, транспортных

средств при осуществлении перевозок и тому подобное, приводящие к выбросу СДЯВ в атмосферу в количествах, представляющих опасность массового поражения людей и животных.

4. **Разрушение опасного объекта** – его состояние в результате катастроф, стихийных бедствий, приведших к полной разгерметизации всех емкостей и нарушению технологических коммуникаций.

5. **Первичное облако СДЯВ** – облако, образующееся в результате мгновенного (1 – 3 мин) перехода в атмосферу части содержимого емкости со СДЯВ при ее разрушении.

6. **Вторичное облако СДЯВ** – облако, образующееся в результате испарения разлившегося вещества с подстилающей поверхности.

7. **Эквивалентное количество вещества** – такое количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии эквивалентен масштабу заражения количеством данного вещества, перешедшим в первичное (вторичное) облако.

8. **Площадь зоны фактического заражения СДЯВ** – площадь территории, зараженной СДЯВ в опасных для жизни пределах.

9. **Площадь зоны возможного заражения СДЯВ** – площадь, в пределах которой под воздействием изменения направления ветра может перемещаться облако СДЯВ.

## **7.2. Порядок расчета прогнозирования глубины зоны заражения СДЯВ на случай аварии**

Определение глубины зоны заражения СДЯВ осуществляется по табл. 103, в которой значения глубины зависят от количественных характеристик выброса и скорости ветра.

Количественными характеристиками выброса СДЯВ являются эквивалентное количество вещества по первичному облаку и эквивалентное количество вещества по вторичному облаку. Расчеты по первичному и вторичному облаку производятся в зависимости от агрегатного состояния СДЯВ:

– для сжиженных газов – отдельно по первичному и вторичному облаку;

– для сжатых газов – только по первичному облаку;

– для ядовитых жидкостей, кипящих выше температуры окружающей среды, – только по вторичному облаку.

Таблица 103. Расчетная таблица для определения глубины зон возможного заражения СДЯВ, км

Скорость ветра, м/с	Эквивалентное количество СДЯВ в первичном (или вторичном) облаке, т															
	0,1	0,5	1,0	3,0	5,0	10	20	30	50	70	100	300	500	700	1000	2000
1	1,25	3,16	4,75	9,18	12,53	19,20	39,56	38,13	52,67	65,23	81,91	166	231	288	363	572
2	0,84	1,92	2,84	5,35	7,20	10,85	16,44	21,02	28,73	35,35	44,09	87,79	121	150	189	295
3	0,68	1,53	2,17	3,99	5,34	7,96	11,94	15,18	20,59	21,21	31,30	61,47	84,50	104	130	202
4	0,59	1,33	1,88	3,28	4,36	6,46	9,62	12,18	16,43	20,05	24,80	48,18	65,92	81,17	101	157
5	0,53	1,19	1,68	2,91	3,75	5,53	8,19	10,33	13,88	16,89	20,82	40,11	54,67	67,15	83,60	129
6	0,48	1,09	1,53	2,66	3,43	4,88	7,20	9,06	12,14	14,79	18,13	34,67	47,09	56,72	71,70	110
7	0,45	1,00	1,42	2,46	3,17	4,49	6,48	8,14	10,87	13,17	16,17	30,73	41,63	50,93	63,16	96,30
8	0,42	0,94	1,33	2,30	2,97	4,20	5,92	7,42	9,90	11,98	14,68	27,75	37,49	45,79	56,70	89,20
9	0,40	0,88	1,25	2,17	2,80	3,96	5,60	6,86	9,12	11,03	13,50	25,39	34,24	41,76	51,60	78,30
10	0,38	0,84	1,19	2,06	2,66	3,76	5,31	6,50	8,50	10,23	12,54	23,49	31,61	38,50	47,53	71,90
11	0,36	0,80	1,13	1,96	2,53	3,58	5,06	6,20	8,01	9,61	11,74	21,91	29,44	36,81	44,15	66,62
12	0,34	0,76	1,08	1,88	2,42	3,43	4,85	5,94	7,67	9,07	11,06	20,58	27,61	33,55	41,30	62,20
13	0,33	0,74	1,04	1,80	2,37	3,29	4,66	5,70	7,37	8,72	10,48	19,45	26,04	31,62	38,90	58,44
14	0,32	0,71	1,00	1,74	2,24	3,17	4,49	5,50	7,10	8,40	10,04	18,46	24,69	29,95	36,81	55,20
15	0,31	0,69	0,97	1,68	2,17	3,07	4,34	5,31	6,86	8,11	9,70	17,60	23,50	28,48	34,98	52,37

Примечания: 1. При скорости ветра более 15 м/с размеры зон заражения принимать как при скорости ветра 15 м/с.  
 2. При скорости ветра менее 1 м/с размеры зон заражения принимать как при скорости ветра 1 м/с.

Эквивалентное количество вещества по первичному облаку определяется по формуле, т,

$$Q_{\text{э1}} = Q_0 K_1 K_3 K_5 K_7, \quad (319)$$

где  $Q_0$  – количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т;

$K_1$  – коэффициент, учитывающий условия хранения СДЯВ;

$K_3$  – коэффициент, равный отношению поражающий токсодозы хлора к поражающей токсодозе другого СДЯВ (табл. 104);

$K_5$  – коэффициент, характеризующий степень вертикальной устойчивости воздуха: для инверсии – 1; для изотермии – 0,23; для конвекции – 0,08;

$K_7$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха (табл. 104, для сжатых газов  $K_7 = 1$ ).

При авариях на хранилищах сжатого газа величина  $Q_0$  рассчитывается по формуле, т,

$$Q_0 = dV_{\text{хр}}, \quad (320)$$

где  $d$  – плотность СДЯВ, т/м<sup>3</sup> (см. табл. 104);

$V_{\text{хр}}$  – объем хранилища, м<sup>3</sup>.

При авариях на газопроводе величина  $Q_0$  вычисляется по выражению, т,

$$Q_0 = \frac{ndV_r}{100}, \quad (321)$$

где  $n$  – плотность содержания СДЯВ в природном газе, %;

$d$  – плотность СДЯВ, т/м<sup>3</sup> (см. табл. 104);

$V_r$  – объем секции газопровода между автоматическими отсекающими, м<sup>3</sup>.

Эквивалентное количество вещества по вторичному облаку рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{э2}} = \frac{Q_0}{dh} (1 - K_1) K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7, \quad (322)$$

где  $h$  – толщина слоя СДЯВ, м; толщина слоя жидкости для СДЯВ, разливающейся свободно на подстилающей поверхности, принимается равной 0,05 м по всей площади разлива; для СДЯВ, разливающейся в поддон или обвалку, величина  $h$  определяется из соотношения  $h = H - 0,2$ , где  $H$  – высота поддона (или обвалов), м;

$K_2$  – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств СДЯВ (см. табл. 104);

$K_4$  – коэффициент, учитывающий скорость ветра (табл. 105);

$K_6$  – коэффициент, связанный со временем, прошедшим после аварии (табл. 106).

Расчет глубины зоны заражения первичным (или вторичным) облаком СДЯВ ведется по табл. 103. В ней приведены максимальные значения глубины зон заражения первичным  $\Gamma_1$  или вторичным  $\Gamma_2$  облаком СДЯВ, определяемые в зависимости от эквивалентного количества вещества и скорости ветра. Полная глубина зоны заражения  $\Gamma$ , обусловленная воздействием первичного и вторичного облаков СДЯВ, рассчитывается по формуле, км,

$$\Gamma = \Gamma' + 0,5\Gamma'', \quad (323)$$

где  $\Gamma'$  – наибольшее из значений  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , км;

$\Gamma''$  – наименьшее из значений  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , км.

Полученное значение  $\Gamma$  сравнивается с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс  $\Gamma_{\text{п}}$  (табл. 107). Последнее определяется с учетом скорости ветра и соотношения приземного слоя атмосферы при четырехчасовой продолжительности сохранения метеорологических условий. В качестве окончательной глубины заражения принимают меньшее из двух сравниваемых между собой значений ( $\Gamma$  и  $\Gamma_{\text{п}}$ ).

Таблица 104. Характеристики СДЯВ и вспомогательные коэффициенты для определения глубины зон заражения

Наименование СДЯВ	Плотность СДЯВ, т/м <sup>3</sup>		Поражающая токсодоза, мг·мин/м <sup>3</sup>	Значение вспомогательных коэффициентов							
	Газ	Жидкость		К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	К <sub>3</sub>	К <sub>7</sub> при температуре СДЯВ, °С				
							-40	-20	0	+20	+40
Аммиак (под давлением)	0,0008	0,681	15,0	0,18	0,025	0,04	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,4}{1}$
Водород фтористый	–	0,989	4,0	0	0,028	0,15	0,1	0,2	0,5	1,0	1,0
Водород хлористый	0,0016	1,191	2,0	0,28	0,037	0,30	$\frac{0,64}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,2}{1}$
Сероуглерод	–	1,263	45,0	0	0,021	0,013	0,1	0,2	0,4	1,0	2,1
Соляная кислота	–	1,198	2,0	0	0,021	0,30	0	0,1	0,3	1,0	1,6
Фтор	0,0017	1,512	0,2	0,95	0,038	3,0	$\frac{0,7}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{0,9}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,1}{1}$
Хлор	0,0032	1,553	0,6	0,18	0,052	1,0	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,4}{1}$
Хлорпикрин	–	1,658	0,02	0	0,002	30,0	0,03	0,1	0,3	1,0	2,9

Примечание. Значение К<sub>7</sub> в числителе – для первичного облака; в знаменателе – для вторичного облака.

Таблица 105. Значение коэффициента  $K_4$  в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	15
$K_4$	1,0	1,33	1,67	2,0	2,34	2,67	3,0	3,34	3,67	4,0	...	5,68

Таблица 106. Значение коэффициента  $K_6$  в зависимости от времени, прошедшего после начала аварии

Время, прошедшее после начала аварии, ч	1	2	3	4
$K_6$	1,0	1,74	2,41	3,03

Примечание. Если после начала аварии прошло более 4 ч ( $N > 4$  ч), то значение коэффициента  $K_6$  определяется по формуле  $K_6 = N^{0,8}$ .

Таблица 107. Предельные значения глубин переноса воздушных масс за 4 ч при различных скоростях ветра, км

Состояние приземного слоя атмосферы	Скорость ветра, м/с														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Инверсия	20	40	64	84	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Изотермия	24	24	24	24	116	140	164	188	212	236	260	284	304	328	352
Конвекция	28	56	84	112	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечания. 1. Если время после начала аварии  $N > 4$  ч, то значение глубины зоны, найденное по табл. 103, сравнивается с предельно возможным значением переноса воздушных масс  $\Gamma_n$ , которое определяется по формуле  $\Gamma_n = N \cdot V$ , где  $V$  – скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха для конкретных значений скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха в районе аварии, км/ч (табл. 108). 2. Окончательной расчетной глубиной зоны заражения следует принимать меньшее из двух сравниваемых значений.

Таблица 108. Скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха

Степень вертикальной устойчивости воздуха	Скорость ветра, м/с														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Инверсия	5	10	16	21	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Изотермия	6	12	18	24	28	35	41	47	53	59	65	71	76	82	88
Конвекция	7	14	21	28	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание: степень вертикальной устойчивости воздуха по прогнозу погоды можно определить из табл. 110.

Таблица 109. Угловые размеры зоны возможного заражения СДЯВ в зависимости от скорости ветра ( $U$ )

$U$ , м/с	1	1	2	2
$\varphi$ , град	360	180	90	45

Таблица 110. Определение степени вертикальной устойчивости воздуха по прогнозу погоды

Скорость ветра, м/с	Ночь		Утро		День		Вечер	
	Ясно, переменная облачность	Сплошная облачность						
2,0	из	из	из (ин)	из	к (из)	из	ин	из
1...3,9	ин	из	из (ин)	из	из	из	из (ин)	из
4	из	из	из	из	из	из	из	из

Примечания: 1. Обозначения: ин – инверсия; из – изотермия; к – конвекция. 2. «Утро» – время в течение 2 ч после восхода солнца; «вечер» – время в течение 2 ч после захода солнца; остальное время соответственно «день» и «ночь». 3. Скорость ветра и степень вертикальной устойчивости воздуха при расчетах принимаются на момент начала аварий.

### 7.3. Порядок расчета прогнозирования глубины зоны заражения СДЯВ при разрушении опасного объекта

При разрушении опасных объектов в атмосферу могут выбрасываться одновременно несколько СДЯВ, что увеличивает опасность поражения и должно учитываться при определении глубины зоны заражения.

Суммарное эквивалентное количество СДЯВ в этих случаях рассчитывается по формуле

$$Q_{\Sigma} = 20K_4K_5 \sum_{i=1}^n K_{2i}K_{3i} K_{6i}K_{7i} \frac{Q_i}{d_i}, \quad (324)$$

где  $K_{2i}, K_{3i}, K_{6i}, K_{7i}$  – коэффициенты, характеризующие  $i$ -е СДЯВ (см. табл. 104, 106),  $K_4$  – см. табл. 105.

$Q_i$  – запасы  $i$ -го СДЯВ на объекте, т;

$d_i$  – плотность  $i$ -го СДЯВ, т/м<sup>3</sup> (см. табл. 104).

Полученное по табл. 103 значение глубины заражения  $\Gamma$  в зависимости от рассчитанной величины  $Q_{\Sigma}$  и скорости ветра сравнивается с данными табл. 107. Окончательной расчетной глубиной зоны заражения при четырехчасовой продолжительности сохранения метеоусловий следует принимать меньшее из двух сравниваемых между собой значений ( $\Gamma$  и  $\Gamma_{п}$ ).

### 7.4. Порядок расчета определения площади зоны заражения

Различают зоны возможного заражения (при составлении прогноза на случай аварии) и фактического заражения (при оперативных действиях после аварии). Площадь зоны заражения первичным (вторичным) облаком определяется по формуле

$$S_{\text{в}} = 8,72 \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma^2 \varphi, \quad (325)$$

где  $S_{\text{в}}$  – площадь зоны возможного заражения СДЯВ, км<sup>2</sup>;

$\Gamma$  – глубина зоны заражения, км;

$\varphi$  – угловые размеры зоны возможного заражения, град (табл. 109).

Площадь зоны фактического заражения  $S_{\phi}$  рассчитывается по формуле, км<sup>2</sup>,

$$S_{\phi} = K_8 \Gamma^2 N^{0,2}, \quad (326)$$

где  $K_8$  – коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха: для инверсии – 0,235; для изотермии – 0,138; для конвекции – 0,235;  $N$  – время, прошедшее со времени аварии, ч.

### **7.5. Порядок расчета определения времени подхода зараженного воздуха к жилым зонам, населенным пунктам и другим объектам**

Время подхода облака СДЯВ к заданному объекту (жилой зоне, населенному пункту, сельскохозяйственному объекту и др.) определяется по формуле

$$t = l/v, \quad (327)$$

где  $l$  – расстояние от источника заражения до заданного объекта, км;

$v$  – скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха, км/ч (см. табл. 85).

### **7.6. Порядок расчета определения времени подхода поражающего действия СДЯВ**

Продолжительность поражающего действия СДЯВ определяется временем его испарения с площади разлива. Время испарения СДЯВ с площади разлива находится по формуле, ч,

$$T = \frac{dh}{K_2 K_4 K_7}, \quad (328)$$

где  $d$  – плотность СДЯВ, т/м<sup>3</sup>;

$h$  – толщина слоя СДЯВ, м.

## 7.7. Пример расчета прогнозирования масштабов заражения СДЯВ при аварии

Оценить опасность возможного очага заражения на случай аварии на промышленном объекте. На объекте в газгольдере емкостью 2000 м<sup>3</sup> хранится сжатый аммиак. Температура воздуха – 40 °С, метеоусловия – инверсия, скорость ветра – 1 м/с. На расстоянии 200 – 300 м в юго-западном направлении от места аварии расположены жилые районы, к северу и востоку – промышленная зона, на западе – сельскохозяйственные угодья.

### Решение

1. По формуле (320) определяем величину выброса СДЯВ  $Q_0 = 0,0008 \cdot 2000 = 1,6$  т.

2. По формуле (319) находим эквивалентное количество вещества в первичном облаке  $Q_{з1} = 1,6 \cdot 0,18 \cdot 0,04 \cdot 1 \cdot 1,4 = 0,016$  т.

3. По табл. 103 находим глубину зоны заражения  $\Gamma = 1,25$  км.

4. По табл. 107 определяем предельную глубину переноса воздушных масс  $\Gamma_{п} = 20$  км.

5. Окончательная глубина зоны заражения – 1,25 км.

6. По формуле (325) вычисляем площадь зоны возможного заражения облаком СДЯВ  $S_{в} = 8,72 \cdot 10^3 \cdot 1,25^2 \cdot 180 = 2,45$  км<sup>2</sup>.

7. По формуле (327) рассчитываем время подхода зараженного воздуха к жилым районам и другим объектам  $t = 0,30/5 = 0,06$  ч.

Таким образом, облако зараженного воздуха в случае аварии может представлять опасность для людей и животных на расстоянии 1,25 км от газгольдера. Учитывая направление ветра, можно определить, какие объекты попадут в зону воздействия (зная площадь заражения и угол  $\varphi$ ) СДЯВ. При этом надо учесть, что передний фронт зараженного воздуха достигнет жилых районов практически мгновенно, т. е. всего за 0,06 ч.

## Контрольные вопросы

1. Что такое СДЯВ?
2. Какими показателями прогнозируются масштабы зон заражения?
3. Раскройте понятие «зона заражения».
4. Охарактеризуйте понятие «авария».
5. Что представляет собой разрушение опасного объекта?
6. Чем характеризуется первичное облако СДЯВ?
7. Чем характеризуется вторичное облако СДЯВ?
8. Раскройте понятие эквивалентного количества вещества.
9. Что представляет собой площадь зоны фактического заражения?
10. Охарактеризуйте понятие площади зоны возможного заражения.
11. Что является количественными характеристиками выброса СДЯВ?
12. Как определяется эквивалентное количество вещества по первичному облаку?
13. Как определяется эквивалентное количество вещества по вторичному облаку?
14. Как рассчитывается суммарное эквивалентное количество СДЯВ при разрушении опасного объекта ?
15. Как определяется площадь зоны заражения первичным облаком?
16. Как находится время подхода облака СДЯВ к заданному объекту?

## Глава 8. ШУМ

### 8.1. Общие положения и параметры звукоизлучения

Поверхность конструкции, совершающая колебания, является излучателем (источником) звуковой энергии, которая создает акустическое поле шумящего объекта. Образующееся акустическое поле характеризуется звуковым давлением  $P$  и колебательной скоростью  $U$ , возникающими в точке воздушной среды при прохождении через нее звуковой волны. Энергетическими характеристиками акустического поля являются интенсивность  $J$ , т. е. количество энергии упругих волн, проходящих за единицу времени через единицу поверхности в направлении нормали; мощность излучения  $N_{\text{изл}}$ , т. е. количество энергии, проходящей (уходящей на бесконечность) за единицу времени через замкнутую поверхность, огибающую источник звука; плотность энергии звуковых волн  $W$  – количество энергии, содержащейся в единице объема среды. Важную роль при расчете акустического поля механизма имеет характеристика направленности звукоизлучения источника, т. е. угловое пространственное распределение образующегося вокруг него звукового давления.

Единицы измерения перечисленных величин и формулы их взаимосвязи приведены в табл. 111.

Акустическое поле электрической машины любого типа создается, как было указано выше, источниками различной природы, которые излучают в различных диапазонах частот. Динамические свойства физических систем принято описывать в частотной области. Поэтому полная характеристика излученного шумового поля должна быть представлена не только величиной звукового давления либо уровнем звукового давления, но и характеристикой частотной зависимости указанных величин – спектром.

Таблица 111. Параметры акустического поля

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Формула взаимосвязи
Звуковое давление	$P$	Па	$P = \rho_0 \cdot C_0 \cdot U$
Колебательная скорость	$U$	м/с	$U = P / (\rho_0 \cdot C_0)$
Интенсивность	$J$	Вт/м <sup>2</sup>	$J = \rho \cdot U$
Звуковая мощность	$N$	Вт	$N = J \cdot S$
Плотность энергии	$W$	Вт · с/м <sup>3</sup>	$W = P^2 / 2 \cdot \rho_0 \cdot C_0$
Уровень шума (звукового давления)	$L_p$	дБ	$L_p = 20 \cdot \lg(P / P_0)$ $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па

Здесь  $\rho_0 = 1,21$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха;  $C_0$  – скорость звука в воздухе 344 м/с.

Излученное вибрирующей поверхностью звуковое поле зависит от формы последней. Легко показать, что плоская бесконечная поверхность служит источником волн плоского типа, которые характеризуются простой взаимосвязью колебательной скорости и звукового давления  $P = \rho_0 C_0 U$ . Величина  $\rho_0 C_0 = 416$  кг/м<sup>2</sup>·с называется волновым сопротивлением воздушной среды. Рассматривая процесс излучения звуковых волн вибрирующей поверхностью плоского тела, величину  $\rho_0 C_0$  можно определить и как удельное механическое сопротивление, которое необходимо, чтобы возбудить звуковую волну. Поскольку в рассмотрении пренебрегают физическими факторами, связанными с потерями энергии, сопротивление  $\rho_0 C_0$  может быть только сопротивлением излучения. Энергия, рассеянная в сопротивлении  $\rho_0 C_0$ , совпадает с энергией звука, которая излучается единицей площади вибрирующей поверхности. Средняя мощность, отнесенная к единице площади поверхности, излучающей звук, определяется следующим образом:

$$N = \frac{1}{T} \int_0^T P U dt = \frac{\rho_0 C_0}{2} \bar{U}_2 = \frac{1}{2 \rho_0 C_0} \bar{P}^2. \quad (329)$$

Здесь  $P$  и  $U$  – среднеквадратичные значения давления и колебательной скорости. Полученная формула подобна аналогичной формуле для электрических цепей  $R \bar{i}^2 = \bar{V}^2 / R$ , где  $\bar{i}$  и  $\bar{V}$  понимаются как среднеквадратичные значения.

Иной характер поля наблюдается при вибрации поверхности сферической формы. Колебательная скорость и звуковое давление связаны между собой более сложной зависимостью

$$U = \frac{P}{\rho_0 C_0} + \frac{1}{r \rho_0} \int P dt. \quad (330)$$

Первый член вышеуказанной формулы соответствует колебательной скорости звука в так называемом дальнем поле, синфазной со звуковым давлением и, следовательно, ответственной за перенос энергии в звуковое поле. Второе слагаемое определяет поведение волны в ближнем поле. Его называют безваттной составляющей звукового поля, она характеризует перетекание среды вблизи источника звука. Ближнее поле убывает обратно пропорционально частоте и квадрату расстояния от источника. Волновое сопротивление для сферической волны  $Z_{сф}$  выражается комплексной величиной

$$Z_{сф} = \rho_0 C_0 \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} + i \frac{\omega \rho_0 r}{1 + (kr)^2} = R_{изд} + i \omega m_{эф}, \quad (331)$$

где  $k = \omega / C_0$  – волновое число.

Действительная часть волнового сопротивления соответствует сопротивлению излучения сферической волны, которое при больших значениях радиуса излучающей сферы  $k^2 r^2 \gg 1$  совпадает по значению с сопротивлением излучения плоской волны  $R_{изд} = \rho_0 C_0$ . Мнимую часть можно рассматривать как реактивное инерциальное частотно зависимое сопротивление, соответствующее присоединенной массе:

$$m_{эф} = \frac{\rho_0 r}{1 + k^2 r^2}. \quad (332)$$

## 8.2. Расчет звукоизолирующего кожуха промышленного оборудования

Одним из самых рациональных методов снижения уровней шума промышленного оборудования является его уменьшение в самом источнике.

Однако осуществить мероприятия, способствующие уменьшению шума в самом источнике, бывает очень трудно, а иногда совсем невозможно. Поэтому приходится заниматься вопросами глушения шума вне его источника, на пути распространения, применяя для этого

всевозможные шумоглушащие устройства. Следует отметить, что конструкция шумоглушащих устройств может обеспечить требуемый эффект снижения шумности промышленного оборудования.

Для того чтобы та или иная конструкция шумоглушащих устройств обеспечила необходимую величину уменьшения шума, ее нужно правильно спроектировать, следовательно, необходимо иметь методику расчета конструкции шумоглушащих устройств. Одним из наиболее распространенных видов шумоглушащих устройств являются звукоизолирующие кожухи.

Кожухи должны быть выполнены таким образом, чтобы они могли обеспечивать свободный доступ к агрегату, были простыми и удобными в монтаже и демонтаже. Особое внимание должно быть обращено на недопущение неплотностей, щелей и отверстий, которые резко снижают звукоизолирующую способность кожуха.

Звукопоглощающий материал для предохранения его от выдувания воздушным потоком и для удержания его на стенках должен быть закреплен тонкой металлической перфорированной зашивкой.

Акустические свойства пористых материалов, применяемых в звукоизолирующих конструкциях, характеризуются следующими параметрами: постоянной распространения  $\gamma$  и волновым сопротивлением  $\omega$ . Обе эти величины комплексные и записываются в виде выражений [30]

$$\gamma = \beta_m + j\alpha_m, \omega = \omega_r + \omega_i, \quad (333)$$

где  $\beta_m$  – коэффициент затухания;

$\alpha_m$  – волновой коэффициент;

$\omega_r$  и  $\omega_i$  – активная и реактивная часть безразмерного сопротивления.

Вещественная часть постоянной распространения  $\beta_m$  характеризует ослабление амплитуды волны на единицу длины и называется коэффициентом затухания, мнимая часть называется волновым коэффициентом  $\alpha_m$ .

В табл. 112 приведены значения величин  $\gamma$  и  $\omega$  для различных звукопоглощающих материалов. Кроме параметров  $\gamma$  и  $\omega$  акустические свойства материала характеризуются нормальным акустическим импедансом  $Z_{00}$ , который является отношением звукового давления к нормальной компоненте скорости частиц на поверхности материала.

Таблица 112. Параметры звукопоглощающих материалов марки БЗМ и холстов из микроультрасупертонких стекломикрокристаллических штапельных волокон из горных пород

Номер варианта	Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц	Постоянная распространения $\gamma_m = \beta_m + j\alpha_m, 1/m$ (1/см)	Безразмерное акустическое сопротивление $\omega = \omega_r + j\omega_i$	Толщина, мм
1	250	$8,0 + j \cdot 18,0(0,08 + j \cdot 0,18)$	$3,72 - j \cdot 1,00$	30
2	500	$11,0 + j \cdot 22,0(0,11 + j \cdot 0,22)$	$3,63 - j \cdot 1,20$	30
3	1000	$25,0 + j \cdot 33,0(0,25 + j \cdot 0,33)$	$3,12 - j \cdot 1,55$	50
4	2000	$34,0 + j \cdot 54,0(0,34 + j \cdot 0,54)$	$2,27 - j \cdot 1,25$	30
5	4000	$37,0 + j \cdot 78,0(0,37 + j \cdot 0,78)$	$1,94 - j \cdot 0,86$	50
6	8000	$38,0 + j \cdot 100,0(0,38 + j \cdot 1,00)$	$1,72 - j \cdot 0,65$	100
Параметры звукопоглощающего материала АТМ-1				
7	250	$3,2 + j \cdot 6,0(0,032 + j \cdot 0,060)$	$2,40 - j \cdot 1,00$	20
8	500	$8,0 + j \cdot 18,0(0,080 + j \cdot 0,180)$	$1,85 - j \cdot 0,48$	25
9	1000	$14,2 + j \cdot 32,0(0,142 + j \cdot 0,320)$	$1,70 - j \cdot 0,35$	30
10	2000	$19,8 + j \cdot 51,0(0,198 + j \cdot 0,510)$	$1,58 - j \cdot 0,29$	35
11	4000	$22,0 + j \cdot 74,0(0,220 + j \cdot 0,740)$	$1,50 - j \cdot 0,25$	40
12	8000	$22,0 + j \cdot 84,0(0,220 + j \cdot 0,840)$	$1,50 - j \cdot 0,25$	20
Параметры матов без связующих из ультратонкого или супертонкого стеклянного волокна СТВ				
13	250	$6,0 + j \cdot 10,0(0,06 + j \cdot 0,10)$	$2,00 - j \cdot 0,90$	40
14	500	$9,0 + j \cdot 22,0(0,09 + j \cdot 0,22)$	$1,70 - j \cdot 0,55$	50
15	1000	$14,0 + j \cdot 33,0(0,14 + j \cdot 0,33)$	$1,52 - j \cdot 0,26$	60
16	2000	$24,0 + j \cdot 41,0(0,24 + j \cdot 0,41)$	$1,45 - j \cdot 0,10$	40
17	4000	$34,0 + j \cdot 48,0(0,34 + j \cdot 0,48)$	$1,44 - j \cdot 0,05$	60
18	8000	$45,0 + j \cdot 54,0(0,45 + j \cdot 0,54)$	$1,44 - j \cdot 0,04$	50

Окончание табл. 112

Номер варианта	Среднегеометрическая частота октавных полос, Гц	Постоянная распространения $\gamma_m = \beta_m + j\alpha_m, 1/m$ (1/см)	Безразмерное акустическое сопротивление $\omega = \omega_r + j\omega_i$	Толщина, мм
Параметры теплозвукоизоляционных матов марок АТМ-10с				
19	250	$9,0 + j \cdot 25,0(0,09 + j \cdot 0,25)$	$4,84 - j \cdot 1,00$	5
20	500	$16,0 + j \cdot 52,0(0,16 + j \cdot 0,52)$	$4,49 - j \cdot 1,82$	10
21	1000	$31,0 + j \cdot 80,0(0,31 + j \cdot 0,80)$	$3,54 - j \cdot 2,26$	15
22	2000	$36,0 + j \cdot 116,0(0,36 + j \cdot 1,16)$	$2,76 - j \cdot 1,96$	20
23	4000	$37,0 + j \cdot 162,0(0,37 + j \cdot 1,62)$	$2,32 - j \cdot 1,30$	5
24	8000	$38,0 + j \cdot 227,0(0,38 + j \cdot 2,27)$	$1,80 - j \cdot 1,05$	10
Параметры полиуретанового эластичного трудносгораемого поропласта марки ППУ-ЭТ				
25	250	$12,0 + j \cdot 15,0(0,12 + j \cdot 0,15)$	$4,50 - j \cdot 0,90$	5
26	500	$19,0 + j \cdot 29,0(0,19 + j \cdot 0,29)$	$4,30 - j \cdot 0,60$	25
27	1000	$30,0 + j \cdot 52,0(0,30 + j \cdot 0,52)$	$3,70 - j \cdot 0,30$	30
28	2000	$37,0 + j \cdot 86,0(0,37 + j \cdot 0,86)$	$3,00 - j \cdot 0,20$	35
29	4000	$42,0 + j \cdot 103,0(0,42 + j \cdot 1,03)$	$2,60 - j \cdot 0,20$	40
30	8000	$50,0 + j \cdot 113,0(0,50 + j \cdot 1,13)$	$2,40 - j \cdot 0,20$	45

Нормальный акустический импеданс согласно [30] может быть определен по выражению

$$Z_{00} = \omega \frac{Z_2 \operatorname{ch} \gamma \delta + \omega \operatorname{sh} \gamma \delta}{Z_2 \operatorname{sh} \gamma \delta + \omega \operatorname{ch} \gamma \delta} = R_a + jX_{\text{сл}}, \quad (334)$$

где  $Z_2 = -j \operatorname{ctg} \frac{\omega h}{c}$  – акустический импеданс воздушного промежутка;

$\omega$  – угловая частота, Гц;

$\delta$  – толщина звукопоглощающего материала, см;

$R_a$  и  $X_{\text{сл}}$  – соответственно активная и реактивная компоненты импеданса

$$\begin{aligned} \operatorname{ch} \gamma \delta &= \operatorname{ch}(\beta_m + j\alpha_m)\delta = \operatorname{ch} \beta_m \delta \operatorname{ch}(j\alpha_m)\delta + \operatorname{sh} \beta_m \delta \operatorname{sh}(j\alpha_m)\delta = \\ &= \operatorname{ch} \beta_m \delta \cos \alpha_m \delta + j \operatorname{sh} \beta_m \delta \cos \alpha_m \delta, \end{aligned} \quad (335)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sh} \gamma \delta &= \operatorname{sh}(\beta_m + j\alpha_m)\delta = \operatorname{sh} \beta_m \delta \operatorname{ch}(j\alpha_m)\delta + \operatorname{ch} \beta_m \delta \operatorname{sh}(j\alpha_m)\delta = \\ &= \operatorname{sh} \beta_m \delta \cos \alpha_m \delta + j \operatorname{ch} \beta_m \delta \sin \alpha_m \delta; \end{aligned}$$

$m$  – величина воздушного промежутка, см.

При отсутствии воздушного промежутка ( $m = 0$ ), т. е. когда материал установлен непосредственно на стенке, выражение (334) принимает вид

$$Z_{00} = \omega \operatorname{th} \gamma \delta = R_a + jY_{\text{сл}}. \quad (336)$$

Коэффициент звукопоглощения материала для каждой конкретной частоты определяется по формуле

$$\alpha = \frac{4R_a}{(R_a + 1)^2 + X_{\text{сл}}^2}. \quad (337)$$

По выражениям (334) – (337) рассчитываются данные, необходимые для определения звукоизолирующей способности кожуха. Расчет уровней шума, создаваемого промышленным оборудованием, заключенным в звукоизолирующий кожух, производится по формуле

$$L_{\text{зв}} = L_{\text{откр}} - R_{\text{кож}}, \quad (338)$$

где  $L_{\text{откр}}$  – общий (спектральный) уровень шума открытого не звукоизолированного агрегата;

$R_{\text{кож}}$  – звукоизолирующая способность кожуха.

Звукоизолирующая способность кожуха  $R_{\text{кож}}$  вычисляется по следующему выражению [30]:

$$R_{\text{кож}} = R_s - R_\alpha - \Delta R_0, \quad (339)$$

где  $R_s$  – звукоизолирующая способность материала, из которого выполнен кожух;

$R_\alpha$  – величина, учитывающая влияние звукопоглощения внутри кожуха на его звукоизолирующую способность;

$\Delta R_0$  – поправка, учитывающая влияние отверстий на звукоизолирующую способность кожуха.

Значения  $R$  для некоторых материалов приведены в табл. 113.

В случае если стенки кожуха выполнены из разнородных материалов, в формуле (339) вместо  $R_s$  нужно ставить приведенную звукоизолирующую способность  $R_{\text{пр}}$ , которая может быть определена с помощью выражения

$$R_{\text{пр}} = R_0 - 10 \lg \frac{S_0}{S_{\text{кож}}} - \lg \sum \frac{S_i}{S_{\text{кож}}} 10^{0,1(R_0 - R_i)}, \quad (340)$$

где  $R_0$  – звукоизолирующая способность основной конструкции по табл. 113;

$S_0$  – площадь основной части конструкции, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{кож}}$  – площадь всех внутренних поверхностей кожуха, м<sup>2</sup>;

$i = 1, 2, 3 \dots n$  – число элементов кожуха, обладающих меньшей звукоизолирующей способностью  $R_i$  по сравнению с  $R_0$ .

При значениях  $R_i$  больших  $R_0$  звукоизолирующая способность кожуха определяется в полном соответствии с (339).

Величина  $R_\alpha$  определяется по формуле

$$R_\alpha = 10 \lg \frac{1}{\alpha_{\text{ср-кож}}}. \quad (341)$$

Таблица 113. Среднее значение звукоизолирующей способности пластин конструкции из различных материалов, дБ

Номер варианта	Материал пластины	Толщина пластины	Третьоктавные и октавные полосы частот, Гц																		
			63	125	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
1	Сталь	1			18	20	22	23	25	27	28	30	32	33	35	37	39	40	41	40	37
2		3,5			28	30	31	33	34	36	37	39	40	41	40	36	30	33	36	39	41
3		10			38	39	40	40	41	39	35	30	33	36	39	41	44	46	48	49	51
4	Алюминиевомагний- вый сплав	0,8			9	11	12	14	16	17	18	19	21	24	26	27	29	31	32	33	32
5		1			11	13	14	16	17	19	20	22	24	26	27	29	31	31	33	32	30
6		4			20	20	22	23	26	28	29	31	32	33	31	25	28	32	35	37	38
7	Титан	0,6			12	13	15	16	17	19	21	23	25	26	28	30	31	33	35	36	37
8		1,2			17	18	20	21	23	24	26	28	30	31	33	35	36	37	36	34	28
9		3,2			24	25	27	28	30	31	33	35	36	37	36	33	27	30	33	36	38
10	Стеклопластик	2			16	18	18	20	21	23	25	27	28	30	31	33	34	35	34	31	29
11		3			18	19	20	22	23	25	27	28	30	32	33	34	35	34	31	28	30
12		5			20	22	23	25	27	28	30	32	33	34	35	34	31	28	30	32	34
13	Органическое стекло	3			10	13	17	16	19	20	22	24	26	29	30	31	34	35	36	34	31
14		5			16	16	19	21	23	25	27	29	30	32	34	36	36	35	30	32	36
15		10			21	22	24	26	28	30	33	36	35	34	33	30	33	37	42	46	48

Номер варианта	Материал пластины	Толщина пластины	Третьоктавные и октавные полосы частот, Гц																		
			63	125	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
16	Древесно-стружечная плита	0,7	10	15	19			22			26			30			34			38	
17		2	16	20	24			28			32			26			35			33	
18		3	19	23	27			31			35			37			30			39	
19		4	21	25	29			33			36			34			34			41	
20		6	23	27	31			35			37			30			39			43	
21		8	24	28	32			36			34			33			40			44	
22		19	14	17	18			25			30			26			32			38	
23	Древесно-стружечная плита	30	23	23	26			26			26			26			26			26	
24	Алюминиевый лист	0,9	8	11	10			10			10			23			25			20	
25	Свинцовый лист	1,5	22	28	32			32			33			32			33			36	
26		3	25	30	31			31			27			44			33			38	
27	Оцинкованный стальной лист	0,55	3	8	14			14			20			26			27			35	
28		0,9	3	8	14			14			20			32			38			40	
29		1,2	8	13	20			20			24			33			39			44	
30		1,6	9	14	21			21			27			37			43			42	
31	Фибровый картон	12	10	12	16			16			20			30			31			36	

Средний коэффициент звукопоглощения кожуха  $\alpha_{\text{ср\_кож}}$  рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\text{ср\_кож}} = B/(B + S), \quad (342)$$

где  $B$  – постоянная помещения (необработанного),  $\text{м}^2$ ;

$S$  – общая площадь ограждающих поверхностей,  $\text{м}^2$ .

При наличии в кожухе отверстий и щелей звукоизолирующая способность его находится по выражениям:

$$R_{\text{Трi}} = L_{\text{рсум}} - 10\lg B_{\text{ш}} - 10\lg B_{\text{и}} + 10\lg S_i + 6L_{\text{доп}} + 10\lg m, \quad (343)$$

$$R_{\text{Трi}} = L_{\text{ср}} - 10\lg B_{\text{ш}} + 10\lg S_i - L_{\text{доп}} + 10\lg m, \quad (344)$$

где  $L_{\text{рсум}}$  – суммарный октавный уровень звуковой мощности всех источников шума в помещении, дБ;

$B_{\text{ш}}$  и  $B_{\text{и}}$  – соответственно постоянные «шумного» и изолируемого помещений,  $\text{м}^2$ ;

$S_i$  – площадь рассматриваемого ограждения или его элемента, через который шум проникает в соседнее помещение,  $\text{м}^2$ ;

$L_{\text{доп}}$  – допустимый уровень звукового давления в изолируемом помещении, дБ, определяется по [30];

$m$  – общее количество принимаемых в расчет отдельных элементов ограждения, шт.;

$L_{\text{ср}}$  – средний октавный уровень звукового давления в шумном помещении, дБ.

Для агрегатов, общий уровень шума которых лимитируется не одной спектральной составляющей шума, а несколькими или всеми составляющими в слуховом диапазоне частот, звукоизолирующие кожухи рассчитываются в вышеприведенной последовательности. По спектральным составляющим определяется общий уровень шума звукоизолированного источника (агрегата) и по выражению

$$L = 10\lg(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}), \quad (345)$$

где  $n$  – общее количество источников шума в «шумном» помещении, шт.

### **Пример расчета звукоизолирующего кожуха промышленного оборудования**

а) Определить звукоизолирующую способность кожуха (т. е. уменьшение кожухом уровня шума, излучаемого в окружающее пространство агрегатом) при частоте  $f = 250$  Гц (см. табл. 112) и следующих заданных параметрах:

- размеры кожуха  $l \times b \times h = 800 \times 600 \times 1200$  мм (табл. 114);
- материал и толщина кожуха – сталь,  $\delta = 1$  мм (см. табл. 113);
- внутренняя поверхность кожуха облицована звукопоглощающим материалом марки БЗМ толщиной  $\delta = 30$  мм (см. табл. 112);
- кожух имеет два отверстия диаметром  $D = 300$  мм (табл. 114);
- уровень шума в точке, отстоящей от его поверхности на расстоянии  $r = 0,5$  м, составляет при частоте 250 Гц 85 дБ (табл. 114).

б) В помещении машинного зала размерами  $10 \times 10 \times 2,5$  м (табл. 115) установлен агрегат, закрытый звукоизолирующим кожухом, уровень шума которого на расстоянии  $r = 0,5$  м составляет  $L$ , дБ (расчетное значение, которое берется из пункта а). Данный уровень шума соответствует частоте 250 Гц (из данных пункта а), см. табл. 112.

Определить уровень шума в помещении на том же расстоянии после покрытия стен помещения звукопоглощающим материалом – плита «Силакпор» (табл. 116). Значение коэффициента поглощения  $\alpha$  для соответствующей частоты 250 Гц приведены в табл. 116.

### **Решение**

1. По табл. 112 для частоты  $f = 250$  Гц находим постоянную пространства  $\gamma_m$  и волновое сопротивление  $\omega$ :

$$\gamma_m = 8,0 + j \cdot 18,0 = \beta_m + j\alpha_m;$$

$$\omega = 3,72 - j \cdot 1,0 = \omega_r + j\omega_i.$$

2. Определяем акустический импеданс (336) звукопоглощающего материала, закрепленного непосредственно на стенках кожуха:

$$Z_{00} = \omega \frac{\text{sh}\gamma_m \delta}{\text{ch}\gamma_m \delta} = \omega \text{th}\gamma_m \delta = R_\alpha + jY_{\text{сл}},$$

$$\text{sh}\gamma_m \delta = \text{sh}(\beta_m + j\alpha_m)\delta = \text{sh}\beta_m \delta \text{ch}(j\alpha_m)\delta \text{sh}(j\alpha_m)\delta =$$

$$= \text{sh}\beta_m \delta \cos\alpha_m \delta + j \text{ch}\beta_m \delta \sin\alpha_m \delta =$$

$$= \text{sh}0,24 \cdot \cos0,54 + j \text{ch}0,24 \cdot \sin0,54 = 0,242 \cdot 0,858 +$$

$$+ j \cdot 1,03 \cdot 0,514 = 0,21 + j \cdot 0,53 = 0,57 \cdot e^{j68^\circ 88'}.$$

Таблица 114. Уровень шума агрегата и размеры кожуха

Номер варианта	Уровень шума, дБ	Размеры кожуха $l \times b \times h$ , мм	Количество отверстий в кожухе	Размеры (диаметр) отверстий, мм
1	85	800 × 600 × 1200	2	300, 300
2	90	500 × 500 × 600	4	100, 100, 200, 200
3	95	650 × 500 × 800	–	–
4	100	1000 × 800 × 1100	2	100, 100
5	70	1500 × 600 × 1000	4	100, 100, 200, 200
6	65	2000 × 1000 × 1000	4	20, 20, 50, 50
7	50	2500 × 1500 × 800	2	40, 40
8	90	3000 × 2000 × 1500	4	40, 40, 20, 20
9	80	3500 × 3000 × 2000	2	40, 40
10	100	600 × 300 × 200	–	–
11	110	700 × 400 × 300	2	50, 50
12	90	800 × 500 × 400	–	–
13	85	1100 × 600 × 500	4	35, 35, 35, 35
14	70	1200 × 800 × 600	4	50, 50, 50, 50
15	65	1100 × 900 × 700	2	150, 150
16	90	1200 × 1000 × 800	2	300, 300
17	93	1300 × 800 × 600	–	–

Окончание табл. 114

Номер варианта	Уровень шума, дБ	Размеры кожуха $l \times b \times h$ , мм	Количество отверстий в кожухе	Размеры (диаметр) отверстий, мм
18	90	1400 × 900 × 700	4	50, 50, 50, 50
19	87	1500 × 900 × 800	6	20, 20, 20, 20, 20, 20
20	78	1100 × 600 × 1100	4	25, 25, 50, 50
21	63	2200 × 600 × 600	–	–
22	57	1100 × 600 × 600	2	70, 70
23	66	2200 × 1200 × 800	2	60, 60
24	71	2000 × 400 × 400	4	65, 65, 65, 65
25	93	2000 × 400 × 400	2	75, 75
26	95	1000 × 850 × 1000	4	40, 40, 20, 20
27	97	1000 × 850 × 1000	4	50, 50, 50, 50
28	99	2000 × 400 × 400	2	120, 120
29	100	2000 × 400 × 800	2	140, 140
30	110	1000 × 850 × 1000	2	150, 150

Таблица 115. Средний коэффициент звукопоглощения  $\alpha_{\text{ср}}$  ограждающих поверхностей помещения

Номер варианта	Тип помещения	Размеры помещения $l \times b \times h$ , м	Среднегеометрические частоты октавной полосы, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Машинные залы, генераторные испытательные стенды, цехи предприятий пищевой промышленности с ограждениями, облицованными моющей плиткой	10 × 10 × 2,5	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
2		15 × 15 × 2,5								
3		17,5 × 5 × 2,5								
4		12 × 6 × 3								
5		15 × 10 × 3,5								
6		30 × 20 × 4								
7		50 × 30 × 5								
8		70 × 50 × 6								
9		75 × 40 × 6								
10		80 × 60 × 6								
11	Механические и металлообрабатывающие цехи агрегатной сборки в авиационной и судостроительной промышленности	70 × 50 × 6	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
12		100 × 70 × 7								
13		150 × 80 × 10								
14		200 × 100 × 20								
15		170 × 120 × 15								
16		150 × 100 × 10								
17		100 × 70 × 5								
18		100 × 70 × 3								
19		100 × 70 × 5								
20		150 × 100 × 10								

Окончание табл. 115

Номер варианта	Тип помещения	Размеры помещения $l \times b \times h$ , м	Среднегеометрические частоты октавной полосы, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
21	Цехи деревообработки и предприятий текстильной промышленности; посты управления; лаборатории; конструкторские бюро; рабочие помещения управления	30 × 20 × 5	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
22		50 × 30 × 5								
23		20 × 20 × 3								
24		25 × 20 × 3								
25		40 × 30 × 3								
26		50 × 30 × 3								
27		40 × 35 × 5								
28		10 × 10 × 2,5								
29		15 × 10 × 20,5								
30		15 × 10 × 3,5								

Таблица 116. Задания для расчетов

Номер варианта	Тип материала	Толщина материала, мм	Среднегеометрические частоты октавной полосы, Гц						
			125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Плита «Силакпор»	40	0,23	0,39	0,47	0,55	0,84	0,71	0,74
2		45							
3		40							
4		45							
5		40							
6		45							

Окончание табл. 116

Номер варианта	Тип материала	Толщина материала, мм	Среднегеометрические частоты октавной полосы, Гц						
			125	250	500	1000	2000	4000	8000
7	Акустические гипсовые плиты марки АГП	30	0,16	0,39	0,75	0,66	0,47	0,54	0,30
8		40							
9		55							
10		30							
11		55							
12		40							
13		55							
14		30							
15		55							
16	Минераловатные плиты акустические марки ПА/С	20	0,05	0,28	0,60	0,93	0,88	0,83	0,80
17		30							
18		40							
19		50							
20		60							
21		70							
22	Минераловатные плиты акустические марки ПА/О	80	0,07	0,23	0,81	0,93	0,83	0,67	0,60
23		90							
24		100							
25		25							
26		35							
27	Маты из капронового волокна, войлок строительный, акустический войлок	100	0,31	0,55	0,82	0,79	0,72	0,80	0,80
28		25	0,15	0,22	0,54	0,63	0,57	0,52	0,50
29		50	0,34	0,50	0,69	0,67	0,58	0,52	0,50
30		25	0,11	0,31	0,59	0,68	0,58	0,52	0,50

Рассчитываем:

$$\beta_m \delta = 8,0 \cdot 0,03 = 0,240,$$

$$\alpha_m \delta = 18,0 \cdot 0,03 = 0,54, \operatorname{ch} \gamma_m \delta =$$

$$= \operatorname{ch} \beta_m \delta \cdot \cos \alpha_m \delta + j \operatorname{sh} \beta_m \delta \cdot \sin \alpha_m \delta =$$

$$= \operatorname{ch} 0,24 \cdot \cos 0,54 + j \operatorname{sh} 0,24 \cdot \sin 0,54 =$$

$$= 1,03 \cdot 0,857 + j \cdot 0,242 \cdot 0,514 =$$

$$= 0,833 + j \cdot 0,124 = 0,89 e^{j8^\circ 39'},$$

$$Z_{00} = 3,85 e^{j15^\circ 00'} \omega \frac{0,57 e^{j68^\circ 88'}}{0,89 e^{j8^\circ 39'}} = 2,46 e^{j45^\circ 39'} =$$

$$= 2,46 \cos 45^\circ 39' + j \cdot 2,46 \sin 45^\circ 39' =$$

$$= 2,46 \cdot 0,7 + j \cdot 2,46 \cdot 0,71 = 1,72 + j \cdot 1,75 = R_\alpha + jX_{\text{сл.}}$$

3. Определяем коэффициент звукопоглощения  $\alpha$  (337)

$$\alpha = \frac{4R_\alpha}{(R_\alpha + 1)^2 + X_{\text{сл}}^2} = \frac{4 \cdot 1,72}{(1,72 + 1)^2 + 1,75^2} = \frac{4 \cdot 1,72}{7,398 + 3,06} =$$
$$= \frac{6,88}{10,46} = 0,657.$$

4. Рассчитываем всю внутреннюю поверхность кожуха

$$S_{\text{кож}} = 0,8 \cdot 0,6 \cdot 2 + 0,8 \cdot 1,2 \cdot 2 + 0,6 \cdot 1,2 \cdot 2 = 4,32 \text{ м}^2.$$

5. Находим площадь отверстий

$$S_{01} = S_{02} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0,3^2}{4} = 0,0706 \text{ м}^2.$$

6. Определяем поверхность кожуха, облицованного звукопоглощающим материалом:

$$S'_{\text{кож}} = K(S_{\text{кож}} - S_{01} - S_{02}) = 1(4,32 - 0,0706 - 0,0706) = 4,17 \text{ м}^2.$$

Коэффициент  $K = 0,94$ , если каркас (уголки) кожуха звукопоглощающим материалом не облицован.

7. Звукоизолирующая способность кожуха для частоты звуковых колебаний  $f = 250$  Гц определяется по табл. 113  $R_s \approx 18$  дБ.

8. По формуле (342) определяем средний коэффициент звукопоглощения внутри кожуха

$$\alpha_{\text{ср.кож}} = \frac{\alpha S'_{\text{кож}}}{S_{\text{кож}}} = \frac{0,657 \cdot 4,17}{4,32} = 0,634.$$

9. Рассчитываем величину, учитывающую влияние звукопоглощения внутри кожуха на его звукоизолирующую способность (341):

$$R_{\alpha} = 10 \lg \frac{1}{\alpha_{\text{ср\_кож}}} = 10 \lg \frac{1}{0,634} = 1,98 \text{ дБ.}$$

10. Вычисляем поправку  $\Delta R_0$ , учитывающую влияние двух отверстий на звукоизолирующую способность кожуха:

$$\begin{aligned} \Delta R_0 &= 10 \lg \left( 1 + 10 \frac{S_{01}}{S_{\text{кож}}} 10^{0,1 \cdot R_s} + 10 \frac{S_{02}}{S_{\text{кож}}} 10^{0,1 \cdot R_s} \right) = \\ &= 10 \cdot \lg \left( 1 + 10 \frac{0,0706}{4,32} 10^{0,1 \cdot 18} + 10 \frac{0,0706}{4,32} 10^{0,1 \cdot 18} \right) = \\ &= 10 \cdot \lg(1 + 20,58) = 10 \cdot \lg(21,58) = 13,34 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Коэффициенты  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  выбираем равными 7 – 10.

11. Рассчитываем звукоизолирующую способность кожуха на частоте  $f = 250$  Гц.

$$R_{\text{кож}} = R_s - R_{\alpha} - \Delta R_0 = 18 - 1,98 - 13,34 = 2,7 \text{ дБ.}$$

12. Определяем уровень шума агрегата на частоте  $f = 250$  Гц и расстоянии 0,5 м при помещении его в кожух

$$L_{\text{кож}} = L - jR_{\text{кож}} = 85 - 2,7 = 82,3 \text{ дБ.}$$

13. Определяем звукопоглощение помещения до использования звукопоглощающих материалов

$$\begin{aligned} A_1 &= \sum \alpha_i S_i = 2 \cdot 0,08 \cdot 10 \cdot 10 + 2 \cdot 0,08 \cdot 10 \cdot 2,5 + \\ &+ 2 \cdot 0,08 \cdot 10 \cdot 2,5 = 24 \text{ сэбин.} \end{aligned}$$

14. Рассчитываем звукопоглощение помещения после внесения звукопоглотителя (плита «Силакпор»)

$$\begin{aligned} A_1 &= A_3 + \sum \alpha_i S_i = 24 \cdot 0,39 \cdot 10 \cdot 10 + 2 \cdot 0,39 \cdot 10 \cdot 2,5 + \\ &+ 2 \cdot 0,39 \cdot 10 \cdot 2,5 = 141 \text{ сэбин.} \end{aligned}$$

15. Определяем уменьшение уровня шума в помещении после его отделки звукопоглотителем

$$\Delta L = 10 \lg \frac{A_3}{A_1} = 10 \lg \frac{141}{24} = 10 \lg 5,875 = 7,69 \text{ дБ.}$$

16. Рассчитываем уровень шума агрегата после отделки помещения звукопоглотителем

$$L_2 = L_1 - \Delta L = 82,3 - 7,69 = 74,6 \text{ дБ.}$$

## 8.3. Оценка шумового фона транспортных потоков в жилой застройке городов

### 8.3.1. Общие положения

В городах имеются многочисленные источники шума, уровни и ареалы которых постоянно возрастают. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что высокие уровни городских шумов мешают нормальному отдыху, трудовой деятельности людей и являются причиной многих заболеваний. Установлено, что от 30 до 40 % городского населения живет и работает в условиях акустического дискомфорта.

Источниками внешнего звука в городах являются:

- потоки всех видов наземного автомобильного и рельсового транспорта;
- авиационный транспорт в аэропортах и зонах воздушных подходов к аэродромам;
- площадки для погрузочно-разгрузочных работ объектов транспорта, предприятий торговли и других коммунально-бытовых учреждений обслуживания;
- промышленные предприятия, отдельные установки и агрегаты;
- открытые спортивные сооружения и игровые площадки;
- механизмы и установки, выполняющие работы по строительству, уборке и благоустройству городских территорий и др.

Разработка средств и методов шумозащиты, способствующих обеспечению нормативных уровней шума в проектах планировки и застройки городов, осуществляется на основе акустических расчетов уровней шума источников, ожидаемого шумового режима в характерных точках защищаемого объекта и оценки обеспеченности его акустическим комфортом.

Оценка соответствия шумового фона, создаваемого транспортными потоками в жилых застройках городов, нормативным уровням звука на защищенных от шума объектах производится по формуле

$$\gamma = L_{A_{\text{ЭКВ, доп}}} - L_{A_{\text{ЭКВ}}} + A_1 + A_2 + A_3 + A_4, \quad (346)$$

где  $L_{A_{\text{ЭКВ, доп}}}$  – допустимый уровень звука для защищаемого объекта или территории, дБА;

$L_{AЭКВ}$  – эквивалентный уровень звука от транспортных потоков на улицах и дорогах городов, дБА;

$A_1$  – снижение шума в приземном воздушном пространстве  $L_{AЭКВ}$  с учетом расстояния и типа поверхности земли, дБА;

$A_2$  – снижение шума на пути его распространения за счет экранирующих барьеров, дБА;

$A_3$  – снижение шума при наличии на пути его распространения защитных полос зеленых насаждений, дБА;

$A_4$  – снижение шума за счет звукоизоляции оконных проемов, дБА.

Положительное значение  $\gamma$  характеризует обеспеченность нормативного уровня звука (или условий акустического комфорта) в расчетной точке, а отрицательное – необходимое снижение уровня звука, достигаемое снижением шума в источнике  $L_{AЭКВ}$  или повышением шумозащитных качеств средств, препятствующих распространению шума  $A_1; A_2; A_3; A_4$ .

Точки расчета оцениваемых уровней звука располагают на кратчайшем расстоянии от источника в наиболее характерных местах: для зданий и сооружений – в 2 м от наружных ограждающих стен на высоте 1,5 м от пола первого и последнего этажа; для территорий – не менее чем в 2 м от стен окружающих зданий и сооружений на высоте 1,5 м от поверхности земли; для помещений – в 2 м от окна на высоте 1,5 м от поверхности пола.

Оценку уровня звука в точке расчета выполняют для дневного и ночного периода суток (с 7 до 23 ч и с 23 до 7 ч), при этом в дневное время в расчет берется максимальное количество транспортных средств в часы пик.

### **8.3.2. Порядок расчета**

1. Допустимый уровень звука для защищаемого объекта или территории  $L_{AЭКВ.доп}$ .

Допустимые значения эквивалентных уровней звука на территории и в помещениях жилых и общественных зданий устанавливаются по [31] (табл. 117) с учетом поправок к ним на место расположения объекта (табл. 118).

Таблица 117. Нормы допустимых уровней звука [31]

Район застройки, территории, помещения	Допустимый уровень звука	
	$L_{\text{АЭКВ, доп}}$	дБА
Территории больниц и санаториев	45	35
Территории и зоны массового отдыха	50	–
Новый проектируемый жилой район города	55	45
Реконструируемый жилой район со сложившейся застройкой	60	50
Промышленные районы или зоны, включающие жилую застройку	65	55
Территории жилой застройки в 2 м от зданий	55	45
Площадки отдыха в микрорайоне, сады, парки	45	–
Спортивные площадки	55	–
Спортивные залы	50	–
Стадионы	60	–
Палаты больниц, санаториев, операционные больницы	35	25
Жилые комнаты квартир	40	30
Жилые комнаты в общежитиях и гостиницах	45	35
Классы в школах	40	–
Конференц-залы, аудитории, кабинеты	40	–
Помещения управлений и конструкторских бюро в административных зданиях	50	–

Таблица 118. Поправки к допустимым уровням звука [31]

Влияющий фактор	Условия	Поправка, дБА
Месторасположение объектов	Курортный район, места отдыха, туризма, зеленая зона города	–5
	Новый проектируемый жилой район	0
	Район существующей (сложившейся) застройки	+5

2. Эквивалентный уровень звука от транспортных потоков  $L_{\text{АЭКВ}}$ . Шумовой характеристикой транспортного потока является эквивалентный уровень звука  $L_{\text{АЭКВ}}$ , дБА на расстоянии 7,5 м от оси полосы движения транспортных средств.

Метод натурных измерений шумовой характеристики устанавливается [32]. Однако при решении задач прогнозирования приходится определять шумовые характеристики транспортных потоков расчетным путем по формуле

$$L_{\text{АЭКВ}} = L'_{\text{АЭКВ}} + \sum_{i=1}^n \Delta L_{\text{АЭКВ}i}, \quad (347)$$

где  $L'_{AЭКВ}$  – эквивалентный уровень звука, определяемый в зависимости от максимальной интенсивности движения  $Q$ , ед./ч, средневзвешенной скорости движения  $V$ , км/ч, и состава транспортного потока  $\rho$ , %, по номограмме, дБА (рис. 65);

$\sum_{i=1}^n \Delta L_{AЭКВ_i}$  – сумма поправок к эквивалентному уровню звука  $L'_{AЭКВ}$  на влияющие факторы, определяемые в зависимости от продольного уклона проезжей части участка улицы или дороги, шероховатости поверхности и типа дорожного покрытия проезжей части по табл. 119, где  $i = 1, 2, 3$  – порядковый номер вышеперечисленных поправок. Статистическая модель шумовых характеристик транспортных потоков, представленная номограммой, может быть выражена в виде

$$L'_{AЭКВ} = (6 + 0,025V + 0,0375\rho)\lg Q + 1,7N + 45 \quad (348)$$

или

$$L'_{AЭКВ} = 10\lg Q + 13,3\lg V + 8,4\lg \rho, \quad (349)$$

где  $Q$  – интенсивность движения транспортного потока, ед./ч;

$V$  – средневзвешенная скорость движения транспортного потока, ед./ч;

$\rho$  – состав транспортного потока (доля грузовых и общественных транспортных средств от общего числа транспортных средств в потоке), %.

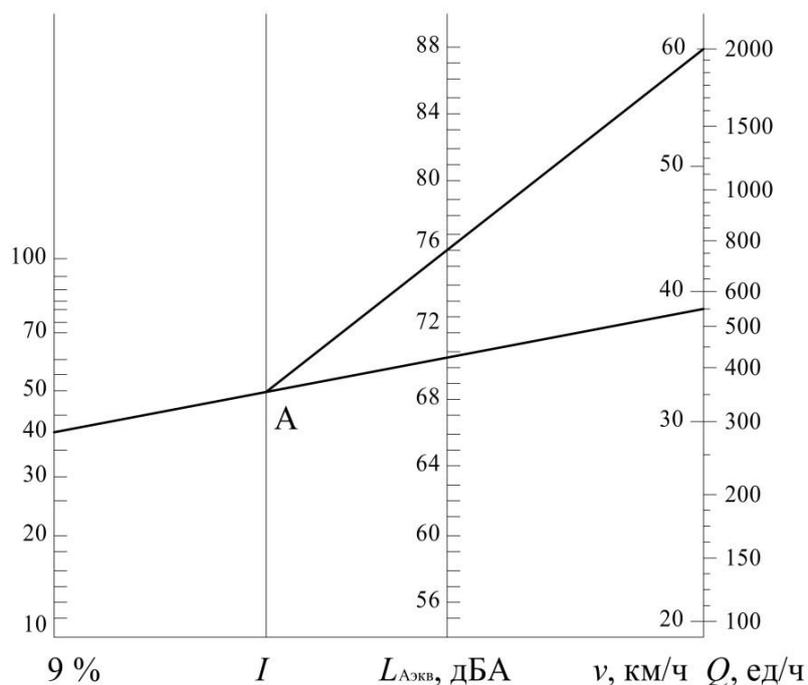


Рис. 65. Номограмма для определения эквивалентного уровня звука транспортных потоков. Дано:  $Q$ ,  $\rho$ ,  $V$ . Решение:  $\rho \rightarrow V$ . Находим т. А;  $A \rightarrow Q$  находим  $L_{AЭКВ}$

Таблица 119. Поправки к эквивалентному уровню звука транспортных потоков

Влияющий фактор	Поправка $\Delta L_{\text{экв}i}$ , дБА
1. Продольный уклон проезжей части участка улицы или дороги, %	
20 и менее	0
40	+1
60	+2
80	+3
100	+4
2. Шероховатость поверхности дорожного покрытия проезжей части, мм	
0,3 – 1,1	+1
1,2 – 2,1	+2
2,2 – 4,5	+3
4,6 – 10	+4
3. Тип дорожного покрытия проезжей части	
Асфальтобетон	0
Бетон	+3
Брусчатка	+5

### 3. Снижение шума в приземном воздушном пространстве $A_1$ .

Относительное снижение шума, создаваемого транспортными потоками в воздушной среде на открытой ровной территории  $A_1$ , определяется по графику (рис. 66).

При распространении звука над поверхностью земли необходимо учитывать также дополнительное снижение шума за счет скользящего поглощения различными типами поверхностей. Для этого величину  $A_1$ , найденную по рис. 66, умножают на  $K_{\text{п}}$  – коэффициент поглощения:

– для поверхности земли с кустарником и деревьями  $K_{\text{п}} = 1,4 \dots 1,2$ ; с газоном  $K_{\text{п}} = 1,1$ ;

– для разрыхленной земли  $K_{\text{п}} = 1,0$ ;

– асфальта, льда, воды  $K_{\text{п}} = 0,9 \dots 0,8$ .

Коэффициент  $K_{\text{п}}$  вводится в расчеты с учетом следующих требований:

– для всех расчетных точек на высоте 5 м, удаленных от источника шума на расстояние до 100 м;

- для всех расчетных точек на высоте не более 10 м, удаленных от источника шума на расстояние от 100 до 500 м;
- для всех расчетных точек независимо от высоты при удалении их от источника шума на расстояние более 500 м.

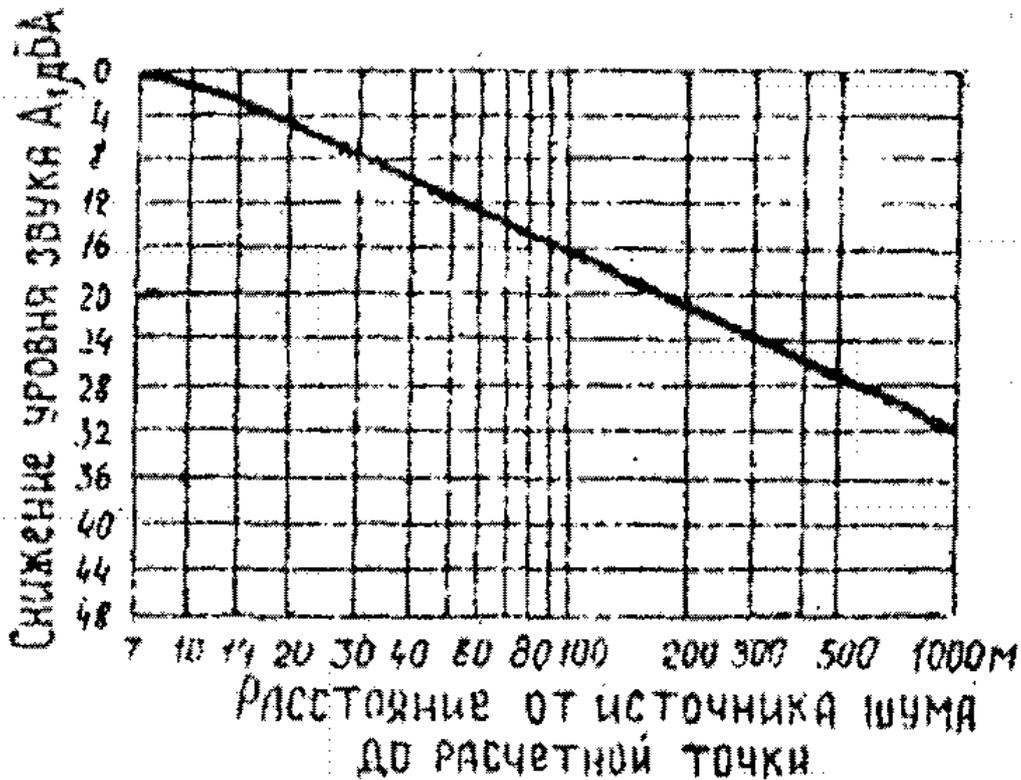


Рис. 66. График для определения снижения уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой

4. Снижение шума на пути его распространения за счет экранирующих барьеров  $A_2$ .

Относительное снижение уровня звука экранизирующими сооружениями  $A_2$  рассчитывается путем определения длины пути прохождения звуковых волн  $\delta$ . Для этого в произвольном масштабе вычерчивают схему расположения источника шума (ИШ), экрана (Э) и расчетной точки (РТ). Наиболее распространенные типы расчетных схем представлены на рис. 67.

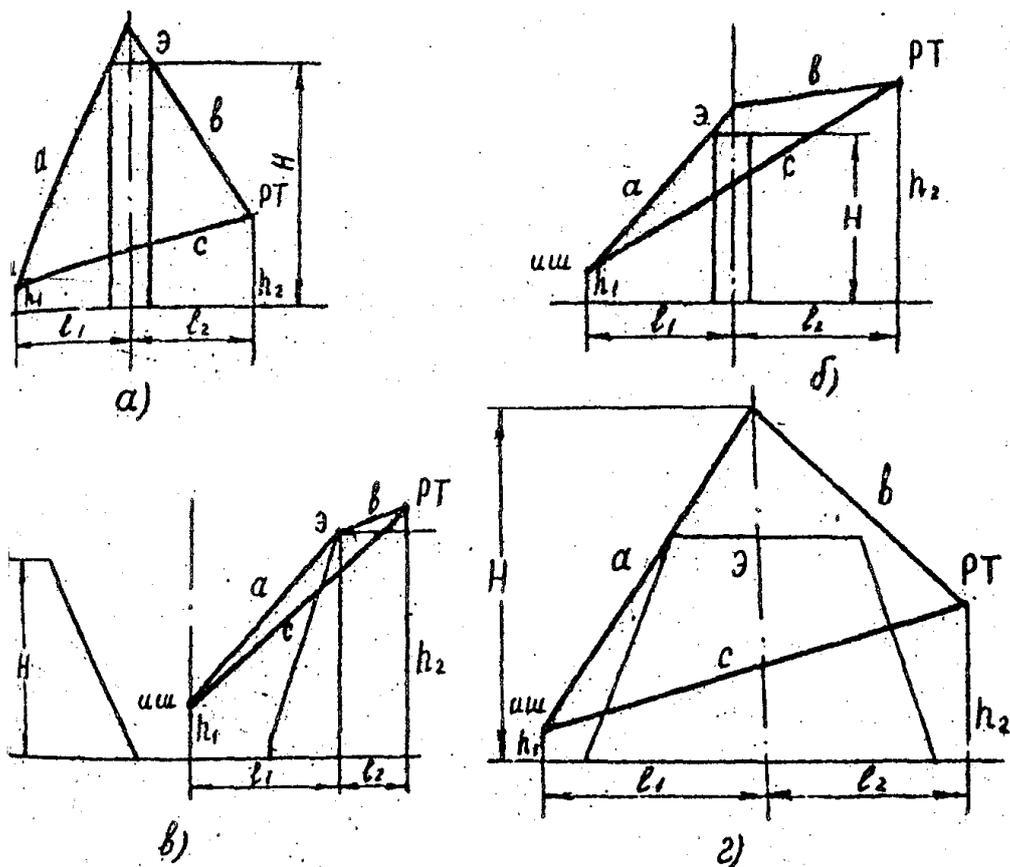


Рис. 67. Расчетные схемы для определения длины пути прохождения звуковых волн  $\delta$  при экранировании источника шума:  $a, б$  – зданиями;  $в$  – выемками;  $г$  – насыпями

По схеме необходимо графически определить длину линий  $a, b, c$  в метрах. Для получения более точных результатов рекомендуется пользоваться следующими формулами:

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{l_1^2 + (H - h_1)^2}, \\
 b &= \sqrt{l_2^2 + (H - h_2)^2} \text{ при } H > h_2, \\
 b &= \sqrt{l_2^2 + (h_2 - H)^2}, \text{ при } h_1 > H, \\
 c &= \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + (h_2 - h_1)^2},
 \end{aligned}
 \tag{350}$$

где  $l_1, l_2$  – проекции расстояний до и после экрана, м;

$h_1$  – высота источника шума от поверхности земли (для транспортных потоков  $h_1$  в расчетах берется 1), м;

$h_2$  – высота РТ от поверхности земли, м;

$H$  – высота экрана, м.

Длина пути прохождения звуковой волны  $\sigma$  определяется по формуле, м,

$$\delta = (a + b) - c. \quad (351)$$

С учетом величины  $\delta$  (м) по графику (рис. 68) определяют величину относительного снижения уровня звука экраном  $A_2$ , дБА.

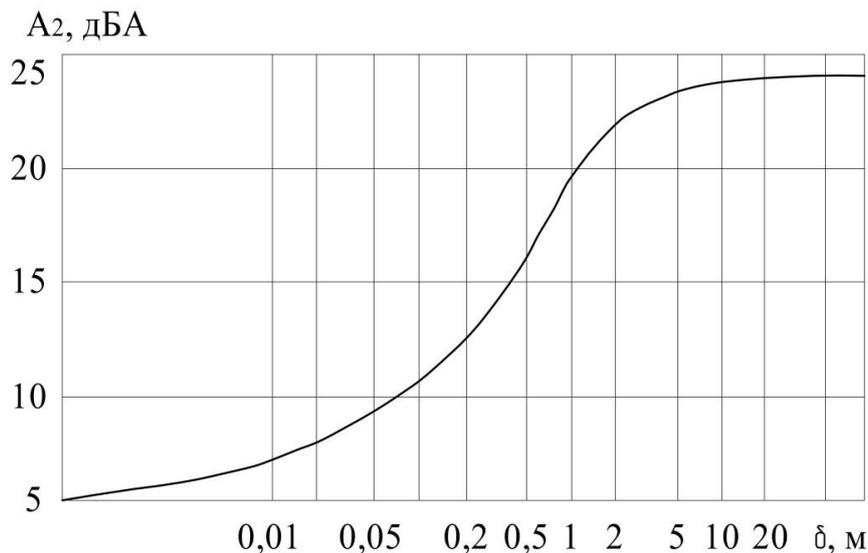


Рис. 68. График для определения снижения уровней звука экраном  $A_2$ , дБА

Для экранов конечной длины (т. е. имеющих четкие границы) расчет  $A_2$  рекомендуется продолжить, учитывая влияние границ на величину снижения уровня звука. С этой целью в произвольном масштабе вычерчивают схему расположения экрана и расчетной точки в плане в соответствии со схемой на рис. 69 и определяют  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

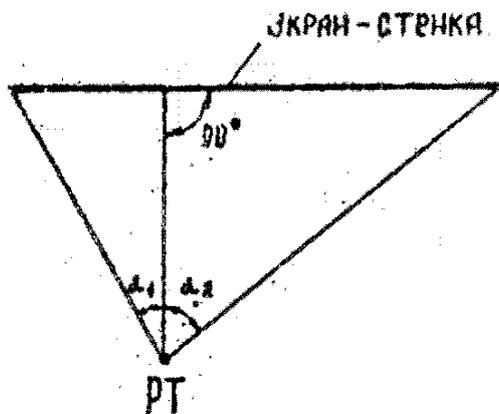


Рис. 69. Расчетная схема для определения эффективности снижения шума экраном-стенкой

В зависимости от величины  $A_2$  и углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  по табл. 120 определяют  $\Delta L_{\alpha_1}$  и  $\Delta L_{\alpha_2}$ . Искомую величину  $A_2$  для экрана конечной длины рассчитывают по выражению

$$A_2 = \Delta L_{\alpha_1(\alpha_2)} + W, \quad (352)$$

где  $\Delta L_{\alpha_1(\alpha_2)}$  – меньшая из величин  $\Delta L_{\alpha_1}$  и  $\Delta L_{\alpha_2}$ , найденных по табл. 120;

$W$  – поправка дБА:

Разность между  $\Delta L_{\alpha_1}$  и  $\Delta L_{\alpha_2}$ , дБА 0 2 4 6 8 10 12 14 16

Поправка  $W$ , дБА 0 0,8 1,5 2,0 2,4 2,6 2,8 2,9 3,0

Таблица 120. Снижение шума для экранов конечной длины

$A_2$ , дБА	$\Delta L_{\alpha_1}$ и $\Delta L_{\alpha_2}$ , дБА, в зависимости от углов $\alpha_{1,2}$ , град								
	45	50	55	60	65	70	75	80	85
6	1,2	1,7	2,3	3,0	3,8	4,5	5,1	5,7	6,0
8	1,7	2,3	3,0	4,0	4,8	5,6	6,5	7,4	8,0
10	2,2	2,9	3,8	4,8	5,8	6,8	7,8	9,0	10,0
12	2,4	3,1	4,0	5,1	6,2	7,5	8,8	10,2	11,7
14	2,6	3,4	4,3	5,4	6,7	8,1	9,7	11,5	13,3
16	2,8	3,6	4,5	5,7	7,0	8,6	10,4	12,4	15,0
18	2,9	3,7	4,7	5,9	7,3	9,0	10,8	13,0	16,8
20	3,2	3,9	4,9	6,1	7,6	9,4	11,3	13,7	19,7
22	3,3	4,1	4,1	6,3	7,9	9,8	11,9	14,5	20,7
24	3,5	4,3	4,3	6,5	8,2	10,2	12,6	15,4	22,6

##### 5. Снижение шума защитными полосами зеленых насаждений $A_3$ .

Шумозащитные полосы зеленых насаждений рекомендуется использовать в качестве дополнительного средства защиты от шума транспортных потоков. Снижение шума зелеными насаждениями происходит главным образом за счет отражения, поглощения и трансформации звуковых колебаний. Наибольший эффект шумозащиты наблюдается в густых посадках, которые имеют плотную зеленую массу крон деревьев и кустарников.

Акустический эффект снижения уровня звука определяют такие факторы, как ширина полосы, дендрологический состав и конструкция посадок. Зеленые насаждения, сформированные в виде специальных шумозащитных полос, могут давать эффект снижения шума до 8 – 10 дБА.

Наиболее эффективными шумозащитными полосами зеленых насаждений являются специальные плотные посадки из древесно-кустарниковых пород крупномерных, быстрорастущих, с густоветвящейся низкоопушенной плотной кроной. При этом подкрановое пространство должно быть закрыто кустарником в виде живой изгороди или подлеска. Со стороны источника шума целесообразно располагать наиболее густые посадки зеленых насаждений.

Посадка деревьев в полосе может быть рядовая или шахматная при расстоянии между деревьями не более 4 м, высоте деревьев не менее 5 – 8 м и кустарника 1,5 – 2 м. При этом шахматная посадка является более эффективной для снижения уровня шума.

Зеленые насаждения из хвойных пород по сравнению с лиственными более эффективны по шумозащите и не зависят от времени года. Однако в городских условиях они растут плохо, поэтому их полезно объединять с лиственными породами деревьев. Данные по снижению шума специальными полосами зеленых насаждений  $A_3$  приведены в табл. 121.

Таблица 121. Снижение шума специальными полосами зеленых насаждений  $A_3$

Ширина полосы, м	Характеристика шумозащитной полосы	Снижение уровня шума за полосой зеленых насаждений $A_3$ , дБА
10	Однорядная при шахматной посадке деревьев внутри полосы	4 – 5
15	Четыре ряда хвойных деревьев: ели, лиственницы сибирской (в шахматной конструкции посадок) с кустарником в двухъярусной живой изгороди из дерна белого, клена татарского, акации желтой, жимолости татарской	8 – 10
20	Пять рядов лиственных деревьев: липы мелколиственной, тополя бальзамического, вяза обыкновенного, клена остролистного (в шахматной конструкции посадок) с кустарником в двухъярусной живой изгороди и подлеском из спиреи клинолистной, жимолости татарской, боярышника сибирского	6 – 7

Ширина полосы, м	Характеристика шумозащитной полосы	Снижение уровня шума за полосой зеленых насаждений $A_3$ , дБА
25	Шесть рядов лиственных деревьев: клена остролистного, вяза обыкновенного, липы мелколистной, тополя бальзамического (в шахматной конструкции посадок) с кустарником в двухъярусной живой изгороди и подлеском из дерна белого, боярышника сибирского, клена татарского	7 – 8
30	Семь-восемь рядов лиственных деревьев: липы мелколистной, клена остролистного, тополя бальзамического, вяза обыкновенного (в шахматной конструкции посадок) с кустарником в двухъярусной живой изгороди и подлеском из клена татарского, жимолости татарской, боярышника сибирского, дерна белого	8 – 9

#### 6. Снижение шума за счет звукоизоляции оконных проемов $A_4$ .

Величина относительного снижения уровня звука в помещении за счет изолирующих свойств оконных проемов (открытых или закрытых)  $A_4$ , дБА, определяется по табл. 122. При этом необходимо учитывать, что значения эффективности даны для конструкции рам, выполненных без дефектов (отсутствие щелей, неплотностей, с полным прилеганием рамы к строительным конструкциям и др.).

Таблица 122. Снижение шума различными типами оконных проемов  $A_4$

Конструкция окна	Толщина, мм		Число рядов уплотняющих прокладок	Относительное снижение уровня звука окном $A_4$ , дБА
	стекла	воздушного промежутка между стеклами		
С открытой форточкой, узкой створкой или фрамугой	–	–	–	10
Спаренное по ГОСТ 11214-2003	3 и 3	55	1	24
	6 и 3	55	1	27
	6 и 4	55	2	28

Конструкция окна	Толщина, мм		Число рядов уплотняющих прокладок	Относительное снижение уровня звука окном $A_4$ , дБА
	стекла	воздушного промежутка между стеклами		
Раздельное по ГОСТ 11214-2003	3 и 3	90	1	25
	3 и 3	90	2	27
	6 и 3	90	2	28
С тройным остеклением по ГОСТ 11214-2003	3, 3 и 3	55 и 45	3	32
	3, 3 и 3	55 и 105	3	33

### 8.3.3. Пример расчета

Проектируется новый жилой район вдоль городской магистрали с непрерывным движением автомобильного транспорта. Интенсивность в часы пик составляет 2000 авт/ч. Средняя скорость 30 км/ч, доля грузового транспорта – до 30 %, продольный уклон дороги – менее 20 %, покрытие – асфальт. Застройка пятиэтажная на расстоянии 20 м от кромки дороги.

Оценить шумовой режим у фасада здания, в жилых комнатах и рассмотреть возможность снижения уровня шума.

#### Решение

1. В соответствии с табл. 117 определяем величину допустимого уровня звука для территории (у фасада здания) и жилых комнат, дБА:

$$L_{A_{\text{ЭКВ, доп}}} = 55 + 0;$$

$$L_{A_{\text{ЭКВ, доп}}} = 40 + 0.$$

2. По номограмме, изображенной на рис. 65 (или расчетным формулам), определяем уровень звука, создаваемого транспортным потоком, дБА:

$$L_{A_{\text{ЭКВ}}} = 73 + 0 + 0 = 73.$$

3. По рис. 66 находим значение величины снижения уровня шума в воздушной среде за счет расстояния  $A_1$ ;  $K_{\text{п}}$  принимаем равным 1

$$A_1 = 10 \cdot 1 = 10 \text{ дБА.}$$

4. Для жилого помещения по табл. 122 определяем величину снижения шума за счет звукоизоляции оконных проемов

$$A_4 = 10 \text{ дБА.}$$

5. Оцениваем шумовой режим для территории (у фасада здания)

$$\gamma = 61 - 73 + 10 = -2 \text{ дБА;}$$

для жилого помещения

$$\gamma = 40 - 73 + 10 + 10 = -13 \text{ дБА.}$$

Таким образом, ни у фасада здания, ни в жилых помещениях первого этажа не будут обеспечены требования [31]. В качестве возможного пути снижения шума можно рекомендовать устройство полос зеленых насаждений, за счет которых можно снизить уровень звука на 4 – 5 дБА. Однако для жилых помещений этого будет недостаточно и необходимы более радикальные решения (например, экранирование; перепланировка помещений в здании; снижение доли грузового транспорта в потоке и др.).

## **8.4. Расчет шумового режима в помещениях**

### **8.4.1. Общие понятия и определения**

Одним из отрицательных факторов окружающей среды на предприятиях промышленности является шум, к которому следует отнести любые звуки, мешающие нормальному режиму труда и отдыха независимо от их происхождения.

1. При расчете шумового режима и разработке рекомендаций по снижению шума приходится сталкиваться с двумя понятиями:

- шумовые характеристики аппаратуры;
- уровни акустических шумов.

2. Основные шумовые характеристики машин и оборудования:

а) уровни звуковой мощности шума в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц  $L_p$ ;

б) скорректированный уровень звуковой мощности  $L_{PA}$ ;

в) характеристика направленности шума  $\Theta$ ;

г) уровни звукового давления в октавных полосах частот, характеризующие спектральный состав шума  $L$ ;

д) уровни звука, под которыми понимают интегральный уровень шума, измеренный прибором с частотной характеристикой типа А  $L_A$ .

Уровни звукового давления, интенсивности и уровни звуковой мощности соответственно определяются по формулам:

$$L = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{J}{J_0} \right), \quad (353)$$

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right), \quad (354)$$

где  $L$  – уровни звукового давления, дБ;

$L_p$  – уровни звуковой мощности, дБ;

$p$  – звуковое давление, Па;

$J$  – интенсивность звука, Вт/м<sup>2</sup>;

$P$  – звуковая мощность, Вт;

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па;

$J_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>;

$P_0 = 10^{-12}$  Вт.

3. Шум оценивается по номеру предельного спектра, который служит для характеристики определенного шума одним числом (например, ПС-70) с учетом интенсивности и спектрального распределения шума. Номер предельного спектра численно равен уровню звукового давления в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц. Предельные спектры даны в санитарных нормах.

4. Величина собственной звукоизоляции ограждений от воздушного шума, определяется по выражению

$$R = 10 \lg(\tau^{-1}), \quad (355)$$

где  $R$  – собственная звукоизоляция ограждений, дБ;

$\tau = (p_1/p_2)$  – коэффициент звукопередачи;

$p_1$  и  $p_2$  – звуковое давление в падающей и проходящей волнах.

5. При акустических расчетах звукопоглощение в проходящих волнах характеризуется постоянной помещения  $B$

$$B = A/(1 - \alpha_{\text{ср}}), \quad (356)$$

$$\alpha = A/S_{\text{общ}}, \quad (357)$$

где  $B$  – постоянная помещения, м<sup>2</sup>;

$A$  – эквивалентная площадь звукопоглощения, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{ср}}$  – средний коэффициент звукопоглощения;

$S_{\text{общ}}$  – общая площадь всех ограждающих поверхностей помещения, м<sup>2</sup>.

Постоянную помещения  $B = B_{1000} \cdot \mu$ , где  $B_{1000}$  определяют по графику рис. 70 и табл. 123. Значение частотного множителя приведено в табл. 124. Выбор индекса прямой – в табл. 123.

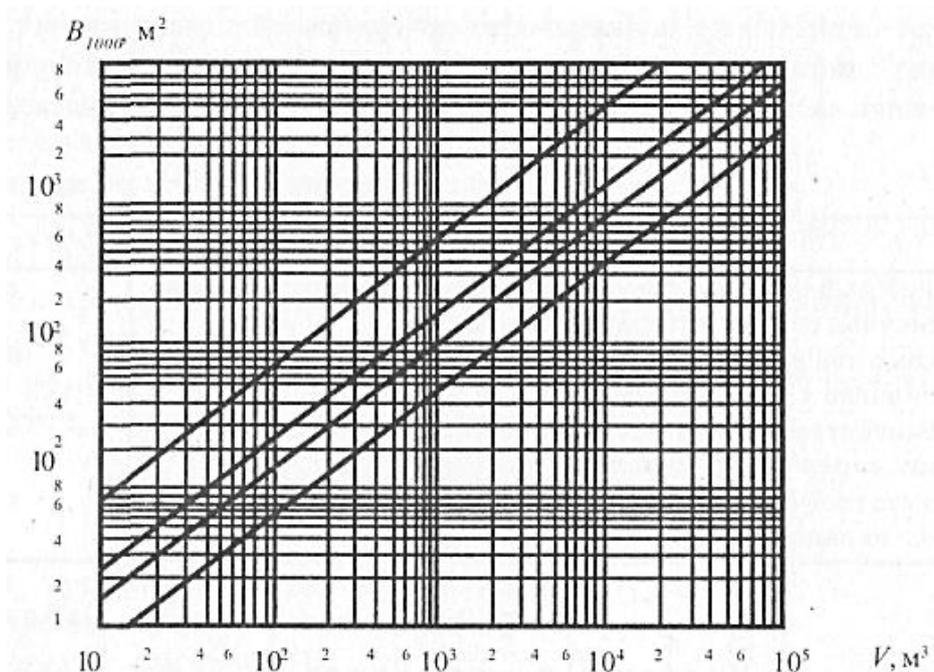


Рис. 70. Зависимость постоянной помещения  $B$  от его объема  $V$

Таблица 123. Выбор индекса

Описание помещений	Индекс прямой
Без мебели, с небольшим количеством людей (металлообрабатывающие цеха, вентиляционные камеры, генераторные и т. п.)	а
С жесткой мебелью или небольшим количеством людей и мягкой мебелью (лаборатории, ткацкие и деревообрабатывающие цеха и т. п.)	б
С большим количеством людей и мягкой мебели (коммутаторные и аппаратные залы, справочные, кинотеатры и т. п.)	в
Только при расчете требуемой звукоизоляции ограждающих конструкций и расчете вентиляционных систем	г

6. Звуковое поле, создаваемое источником шума в замкнутом объеме (помещении), определяется как прямой звуковой волной (прямым звуком  $L_{пр}$ ), излучаемой непосредственно самим источником шума, так и отраженной звуковой волной (диффузным звуком  $L_{диф}$ ) от ограждающих поверхностей. (В данном случае будем считать, что энергия отраженного звука равна энергии диффузного звука).

Зона отраженного звука определяется величиной предельного радиуса  $r_{пр}$  ( $r_{гр}$ ), т. е. таким расстоянием от источника шума, на котором уровень звукового давления отраженного звука равен уровню прямого звука.

Таблица 124. Частотный множитель  $\mu$

Объем помещения, м <sup>3</sup>	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
200	0,80	0,75	0,70	0,80	1,0	1,4	1,8	2,5
200 – 500	0,65	0,62	0,64	0,75	1,0	1,5	2,4	4,2
500	0,50	0,50	0,55	0,70	1,0	1,6	3,0	6,0

Когда в помещении находится один источник шума

$$r_{\text{пр}} = 0,2(B_{8000})^{1/2}. \quad (358)$$

Когда в помещении находится  $n$  одинаковых источников шума

$$r_{\text{пр}} = 0,2(B_{8000}/n)^{1/2}. \quad (359)$$

Когда в помещении находится  $n$  разных источников шума:

$$r_{\text{пр}} = 0,2 \left[ (B_{8000} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{pi}}) \left( \sum 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \right) \right]^{1/2}, \quad (360)$$

где  $r_{\text{пр}}$  – предельный радиус, м;

$B_{8000}$  – постоянная помещения на частоте 8000 Гц, м<sup>2</sup>;

$L_{pi}$  – уровень звуковой мощности рассматриваемого источника шума на частоте 8000 Гц, дБ.

7. Показатель направленности излучения:

$\Phi = 1$ , если источник шума направлен и излучает сферу, если источник стоит на огражденной поверхности (на полу и т. п.);

$\Phi = 2$ , если источник стоит у двугранного угла;

$\Phi = 4$ , если источник стоит у трехгранного угла.

8. Если в данную точку пространства приходят звуковые волны с уровнями  $L$ , то суммарный уровень определяют по формуле

$$L = 10 \lg \sum 10^{0,11i}, \quad (361)$$

где  $L$  – суммарный уровень звукового давления, дБ;

$n$  – общее число независимых слагаемых уровней.

Вместо формулы (361) можно пользоваться данными табл. 125. При использовании табл. 125 надо последовательно складывать уровни, начиная с максимального. Сначала определяют разность двух складываемых уровней, затем добавку к более высокому из складываемых уровней.

Таблица 125. Таблица сложения уровней звуковой мощности и давления

Разность двух складываемых уровней, дБ	0	1	2	3	4	5	6	7	9	10	15	20
Добавка к более высокому уровню, необходимая для получения суммарного уровня, дБ	3	2,5	2	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,5	0,4	0,2	0

*Пример:* сложить два уровня  $L_1 = 90$  дБ,  $L_2 = 95$  дБ.

Определяем добавку по табл. 125:  $\Delta L = 1,2$  дБ; определяем суммарный уровень  $L_{\Sigma} = 95 + 1,2 = 96,2$  дБ.

#### 8.4.2. Расчет звукоизоляции ограждающих конструкций

1. Требуемую звукоизоляцию от шума, создаваемого звуковой волной, распространяющейся по воздуху (воздушный шум), рассчитывают в октавных полосах частот 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Для проведения расчета определяют общее количество ограждений или элементов ограждений (стены, окна, двери, перекрытия и т. п.), через которые шум может проникать в изолирующее помещение. Требуемую звукоизолирующую способность рассчитывают отдельно для каждого элемента ограждения (перекрытие, дверь и т. п.).

В случае проникновения шума из помещения с источником шума в смежное помещение (изолируемое), звукоизолирующая способность определяется

$$R_{\text{тpи}} = L_{\text{pсум}} - 10\lg B_{\text{ш}} - 10\lg B_{\text{н}} + 10\lg S_i + 6 - L_{\text{доп}} + 10\lg m \quad (362)$$

или, если известен усредненный уровень шума в помещении  $L_{\text{сp}}$ :

$$R_{\text{тpи}} = L_{\text{сp}} - 10\lg B_{\text{ш}} + 10\lg S_i - L_{\text{доп}} + 10\lg m, \quad (363)$$

где  $L_{\text{pсум}}$  – суммарный октавный уровень звуковой мощности всех источников шума в помещении, дБ;

$n$  – общее количество источников шума в «шумном» помещении, шт.;

$B_{\text{ш}}$  и  $B_{\text{н}}$  – соответственно постоянные «шумного» и изолируемого помещений,  $\text{м}^2$ ;

$S_i$  – площадь рассматриваемого ограждения или его элемента, через который шум проникает в соседнее помещение,  $\text{м}^2$ ;

$L_{\text{доп}}$  – допустимый уровень звукового давления в изолируемом помещении, дБ, определяется по [31, 32];

$m$  – общее количество принимаемых в расчет отдельных элементов ограждения, шт.;

$L_{\text{ср}}$  – средний октавный уровень звукового давления в шумном помещении, дБ.

## 2. Звукоизолирующие кожуха.

Требуемая эффективность звукоизолирующего кожуха определяется по формулам

$$\Delta L_{\text{эф.тр}} = L - 10\lg S - L_{\text{доп}} + 5, \quad (364)$$

$$\Delta L_{\text{эф.тр}} = L - L_{\text{доп}} + 5, \quad (365)$$

где  $L$  – октавный уровень звуковой мощности шума, дБ;

$S$  – площадь воображаемой поверхности правильной геометрической формы, окружающей машину и проходящей через расчетную точку, м<sup>2</sup>;

$L_{\text{эф.к}}$  – октавный уровень звукового давления в расчетной точке, дБ;

$L_{\text{доп}}$  – допустимый по норме уровень звукового давления в расчетной точке, дБ.

Акустическая эффективность кожуха зависит от звукоизолирующей способности его стенок, размеров кожуха и источников шума, наличия звукопоглощающей облицовки под кожухом, от способа установки кожуха.

Акустическая эффективность кожуха рассчитывается по выражению

$$\Delta L_{\text{эф.тр}} = R_{\text{к}} - 10\lg(S_{\text{к}}/S_{\text{ист}}), \quad (366)$$

где  $R_{\text{к}}$  – звукоизолирующая способность стенок кожуха, дБ, находится по табл. 126;

$S_{\text{ист}}$  – площадь воображаемой поверхности, вплотную окружающей источник, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{к}}$  – площадь поверхности кожуха, м<sup>2</sup>.

Требуемая звукоизолирующая способность стенок кожуха зависит от требуемой эффективности и определяется по формуле

$$R_{\text{к.тр}} = \Delta L_{\text{эф.тр}} + 10\lg\left(\frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{ист}}}\right). \quad (367)$$

Если звукоизолирующая способность стенки кожуха ниже  $R_{к.тр}$ , то следует увеличить толщину стенки или заменить материал кожуха, или нанести на внутренние поверхности кожуха слой звукопоглощающего материала. Приблизленную оценку дополнительной звукоизоляции от облицовки кожуха слоем супертонкого стеклянного или базальтового волокна толщиной 30 – 50 мм ( $\rho_{ср} = 20 \text{ кг/м}^3$ ) или слоем полужестких минераловатных плит толщиной 50 – 80 мм ( $\rho_{ср} = 100 \text{ кг/м}^3$ ) можно произвести по графику рис. 71. Если максимальный размер грани кожуха  $1 \text{ м} < a < 2 \text{ м}$ , то требуется промежуточное значение  $\Delta R_{доп}$  из того же рис. 71.

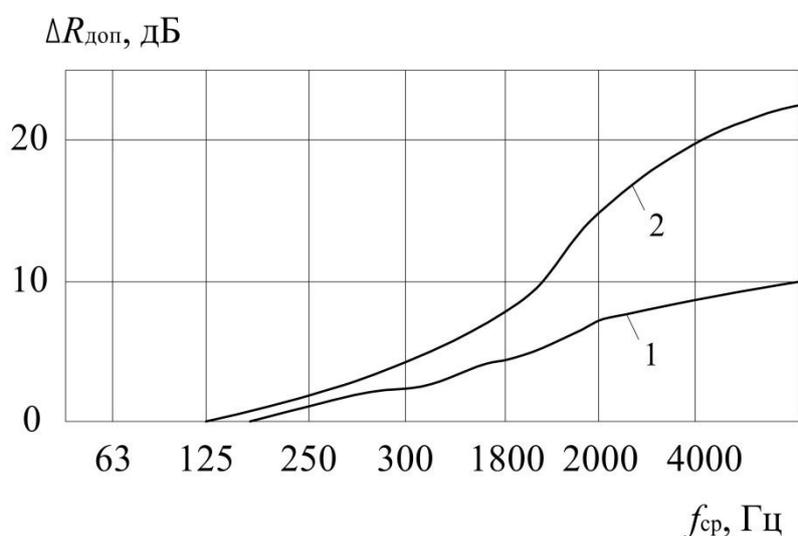


Рис. 71. Дополнительная звукоизолирующая способность слоя звукопоглощающего материала для различных линейных размеров стенки: 1 – максимальный размер стенки  $a = 2 \text{ м}$ ; 2 – максимальный размер стенки  $a = 1 \text{ м}$

Таблица 126. Звукоизолирующая способность стенок кожуха

Конструкция	Толщина, мм	Размер элемента между ребрами	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
			Уровни звуковой мощности, дБ							
Стальной лист, покрытие из мастики ВД-17-58 толщиной 4 мм	0,7	$2 \times 2$	20	24	28	33	37	39	42	45

Конструкция	Толщина, мм	Размер элемента между ребрами	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
			Уровни звуковой мощности, дБ							
Стальной лист, покрытие из минераловатных плит, толщиной 70 мм	1,5	1 × 1	–	20	26	35	39	40	46	48
Дюралюминиевый лист, покрытие из минераловатных плит толщиной										
80 мм	2	2 × 2	20	15	20	28	36	43	50	53
70 мм	3	2 × 2	–	20	25	38	45	51	51	57

#### 8.4.3. Расчет и выбор конструкций звукопоглощающей облицовки

1. Звукопоглощающие конструкции уменьшают в помещении энергию отраженных звуковых волн и частично энергию прямой звуковой волны, если будут расположены близко к источнику шума. Звукопоглощающие облицовки, как правило, размещают на потолке и верхней части стен, а также на специальных диафрагмах, которые подвешивают к потолку [31, 32]. Акустическую обработку имеет смысл проводить в помещениях, в которых средний коэффициент звукопоглощения на частоте 1000 Гц –  $\alpha_{\text{ср}} < 0,25$ .

2. Эквивалентная площадь звукопоглощения вычисляется по формуле

$$A = (BS)/(B + S), \quad (368)$$

а средний коэффициент звукопоглощения – по выражению

$$\alpha = B/B(B + S), \quad (369)$$

где  $B$  – постоянная помещения (необработанного),  $\text{м}^2$ ;

$S$  – общая площадь ограждающих поверхностей,  $\text{м}^2$ .

Если на рабочем месте преобладает поле отраженной звуковой волны, т. е. когда расстояние от расчетной точки до ближайшего источника  $r_{\text{min}} \gg r_{\text{пр}}$ , а  $r_{\text{пр}}$  определяется по формулам (358) – (360), тогда расчет снижения уровня шума выполняется по формуле

$$\Delta L = 10 - \lg(B_1/B), \quad (370)$$

где  $\Delta L$  – величина снижения уровня шума, дБ;

$B$  и  $B_1$  – постоянные помещения до и после акустической обработки, м<sup>2</sup>;

$B$  – находится по подразд. 9.4.1 гл. 9;

$B_1$  – определяется по формуле (371).

Разберем подробнее составные части формулы (370)

$$B_1 = (A_1 + \Delta A)/(1 - \alpha_1), \quad (371)$$

где  $A_1 = \alpha_1(S - S_{\text{обл}})$  – эквивалентная площадь звукопоглощения, но занятая звукопоглощающей облицовкой;

$\alpha$  – средний коэффициент звукопоглощения до его акустической облицовки

$$\alpha_1 = B/(B + S), \quad (372)$$

где  $S$  – общая суммарная площадь ограждающих поверхностей в помещении, м<sup>2</sup>;

$\alpha_1$  – средний коэффициент звукопоглощения акустически обработанного помещения

$$\alpha_1 = (A_1 + \Delta A)/S, \quad (373)$$

где  $\Delta A$  – величина суммарного добавочного поглощения, вносимого конструкциями самой облицовки, она равна

$$\Delta A = \alpha_{\text{обл}} \cdot S_{\text{обл}}, \quad (374)$$

где  $\alpha_{\text{обл}}$  – реверберационный коэффициент звукопоглощения выбранной конструкции;

$S_{\text{обл}}$  – площадь этой конструкции, м<sup>2</sup>.

#### **8.4.4. Примеры расчетов**

##### **Пример 1**

Определить требуемую звукоизолирующую способность и спроектировать перекрытие между вентиляционной камерой объемом 208 м<sup>3</sup> (4 × 13 × 4) и расположенным под ним помещением программистов 1300 м<sup>3</sup> (13 × 25 × 4). Площадь перекрытия, граничащего с вентиляционной камерой, равна 52 м<sup>2</sup>. В камере установлены два вентилятора. Уровни звуковой мощности излучения каждым вентилятором приведены в табл. 127.

Таблица 127. Уровни звуковой мощности излучения каждым вентилятором

Параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	Уровни звуковой мощности, дБ							
1. $L_{p1}$ , дБ	101	101	98	99	103	107	106	111
2. $L_{p2}$ , дБ	99	95	86	86	95	93	112	116
3. $L_{p\text{сум}}$ , дБ	103	102	98	98	104	107	113	117
4. $B_{ш1000}$ ( $V = 208 \text{ м}^3$ ), $\text{м}^2$	–	–	–	–	10	–	–	–
5. $\mu_1$	0,95	0,75	0,7	0,8	1,0	1,4	1,8	2,5
6. $B_{и} = B_{ш1000} \cdot \mu_1$ , $\text{м}^2$	9	8	7	8	10	14	18	25
7. $10\lg B_{ш}$	10	9	8	9	10	11	13	14
8. $B_{и1000}$ ( $V = 1300 \text{ м}^3$ ), $\text{м}^2$	–	–	–	–	240	–	–	–
9. $\mu_2$	0,5	0,5	0,55	0,7	1,0	1,6	3	6
10. $B_{и} = B_{ш1000} \cdot \mu_2$ , $\text{м}^2$	120	120	132	168	240	384	720	1440
11. $10\lg S + 6$ ( $S = 52 \text{ м}^2$ ), дБ	13	23	23	23	23	23	23	23
12. $L_{\text{доп}} = L_{н}$ , дБ	79	70	63	58	55	52	50	49
13. $R_{\text{тр}}$ , дБ	16	25	29	35	38	41	44	47
14. Железобетонная плита с круглыми пустотами толщиной 160 мм	–	37	38	47	53	57	57	–

### Решение

Пользуясь табл. 125, определяем суммарный уровень звуковой мощности  $L_{p\text{сум}}$ , излучаемой обоими вентиляторами.

Требуемую звукоизолирующую способность определяем по формуле (398). Для удобства проведения расчетов формулу (362) разбиваем на элементарные составные части и с учетом последовательности вычислений сводим их в пп. 4 – 14 табл. 127.

Постоянные  $B_{ш}$  и  $B_{и}$  «шумного» и изолируемого помещений рассчитываем согласно п. 5 подразд. 8.4.1. «Шумное» помещение относим к категории (а), изолируемое – к категории (б).

Допустимые уровни звукового давления в помещении по [40] принимаем ПС-55. Перекрытие с требуемой звукоизоляцией выбираем по табл. 132.

## Пример 2

Спроектировать стену (с окном и дверью) и перекрытие кабины наблюдения от УКВ-передатчиков, имеющего размеры  $12 \times 18 \times 8$  м. Размер кабины наблюдения  $12 \times 6 \times 4$  м. Площадь глухой части стены  $S_1$  и перекрытия кабины наблюдения  $S_2$ , граничащих с залом передатчиков, соответственно равны  $48$  и  $72$  м<sup>2</sup>, площадь двери  $S_3 = 4$  м<sup>2</sup>, окна  $S_0 = 3$  м<sup>2</sup>. Суммарный уровень звуковой мощности  $L_{\text{рsum}}$ , излучаемой четырьмя передатчиками, размещенными в зале, приведен в табл. 128.

Таблица 128. Порядок расчета

Параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1. $B_{\text{ш1000}} (V = 1700 \text{ м}^3), \text{ м}^2$	–	–	–	–	70	–	–	–
2. $\mu_1$	0,5	0,5	0,58	0,7	1,0	1,6	3,0	6,0
3. $B_{\text{ш}} = B_{\text{ш1000}} \cdot \mu_1, \text{ м}^2$	35	35	40	49	70	110	210	420
4. $B_{\text{и1000}} (V = 290 \text{ м}^3), \text{ м}^2$	–	–	–	–	30	–	–	–
5. $\mu_2$	0,65	0,62	0,64	0,75	1,0	1,5	2,4	4,2
6. $B_{\text{и}} = B_{\text{и1000}} \cdot \mu_2, \text{ м}^2$	20	19	19	13	30	45	72	126
7. $L_{\text{рsum}}, \text{ дБ}$	93	90	91	107	107	106	105	107
8. $L_{\text{доп}} = L_{\text{н}}$	83	74	68	63	60	57	55	54
9. $10 \lg n + 6 (n = 4), \text{ дБ}$	12	12	12	12	12	12	12	12
10. $10 \lg B_{\text{и}}, \text{ дБ}$	13	13	13	14	15	16	18	21
11. $10 \lg B_{\text{ш}}, \text{ дБ}$	15	15	16	17	18	20	13	26
12. $\Delta = n_7 - n_8 + n_9 - n_{10} - n_{11}, \text{ дБ}$	6	0	6	15	26	15	21	18
13. $10 \lg S_1 (S_1 = 48 \text{ м}^2), \text{ дБ}$	17	17	17	17	17	17	17	17
14. $10 \lg S_2 (S_2 = 72 \text{ м}^2), \text{ дБ}$	19	19	19	19	19	19	19	19
15. $10 \lg S_3 (S_3 = 4 \text{ м}^2), \text{ дБ}$	6	6	6	6	6	6	6	6
16. $10 \lg S_4 (S_4 = 3 \text{ м}^2), \text{ дБ}$	5	5	5	5	5	5	5	5
17. $R_{\text{тр1}} = \Delta + 10 \lg S_1, \text{ дБ}$	11	17	23	42	43	42	38	35
18. $R_{\text{тр2}} = \Delta + 10 \lg S_2, \text{ дБ}$	13	19	15	44	45	44	40	37
19. $R_{\text{тр3}} = \Delta + 10 \lg S_3, \text{ дБ}$	0	6	12	31	32	31	27	24
20. $R_{\text{тр.н}} = \Delta + 10 \lg S_{\text{н}}, \text{ дБ}$	0	5	11	30	31	30	26	13
21. Стены и перекрытия из железобетона, плита толщиной 100 мм	34	40	40	44	50	55	60	60
22. Типовая дверь П-327 с уплотняющей прокладкой	–	29	30	33	35	39	41	42
23. Оконный переплет с двумя стеклами толщиной 3 мм, воздушным промежутком 170 мм и прокладками	27	33	35	36	38	38	38	–

## Решение

Требуемую звукоизолирующую способность каждого элемента ограждения определяем по формуле (362). Для удобства проведения расчетов формулу (362) разбиваем на элементарные составные части и с учетом последовательности вычислений сводим их в пп. 1 – 20 табл. 128.

Определяем согласно п. 5 подразд. 9.4.1 гл. 9 постоянные помещения «шумного» и изолируемого  $V_{ш}$  и  $V_{и}$ , отнеся оба помещения к категории (а). Допустимые уровни звукового давления выбираем по [40] (спектр ПС-60). Расчет сводим в табл. 128.

Конструкцию элементов ограждения выбираем по пп. 2 – 3 подразд. 9.4.3 гл. 9 (с требуемой звукоизоляцией) и табл. 132, 133.

### Пример 3

Задание: помещение цеха в плане представляет собой прямоугольник со сторонами 55 и 20 м. Высота помещения 3,5 м. Объем помещения 3850 м<sup>3</sup>, площадь ограждающих поверхностей стен 525 м<sup>2</sup>, потолка 1100 м<sup>2</sup> и пола 1100 м<sup>2</sup> (общая площадь 2725 м<sup>2</sup>). В цехе установлено 20 станков, занимающих 1/3 площади пола. В остальной части помещения размещена контрольная служба, связанная с малозумными процессами. В расчетной точке, удаленной от ближайших аппаратов на 10 м задан усредненный спектр звукового давления, приведенный в табл. 129.

*Таблица 129. Порядок расчета*

Параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1. $L$ , дБ	78	78	80	82	86	81	77	73
2. $V_{1000}$ , м <sup>3</sup>	–	–	–	–	350	–	–	–
3. $\mu$	0,5	0,5	0,55	0,7	1,0	1,6	3	6
4. $B = V_{1000} \cdot \mu$ , м <sup>3</sup>	175	175	192	254	350	560	1050	2100
5. $S$	2725	2725	2725	2725	2725	2725	2725	2725
6. $B/S$	0,06	0,06	0,07	0,09	0,13	0,2	0,39	0,77
7. $B/S + 1$	1,06	1,06	1,07	1,09	1,13	1,2	1,39	1,77

Параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
8. $A$ , м <sup>2</sup>	165	165	180	233	310	466	757	1190
9. $\alpha$	0,06	0,06	0,066	0,085	0,118	0,17	0,278	0,436
10. $\alpha_{\text{обл}}$	0,05	0,32	0,76	1,0	0,95	0,9	0,98	0,95
11. $\Delta A$ ( $S_{\text{обл}} = 1000$ ), м <sup>2</sup>	55	532	836	1100	1045	990	1078	1045
12. $A_1$ ( $S = 2725$ ), м <sup>2</sup>	98	98	107	138	192	278	452	710
13. $A_1 + \Delta A$ , м <sup>2</sup>	153	450	943	1238	1238	1268	1530	1855
14. $\alpha_1$	0,06	0,17	0,35	0,45	0,45	0,46	0,56	0,68
15. $1 - \alpha_1$	0,94	0,83	0,65	0,55	0,55	0,54	0,44	0,32
16. $B_1$ , м <sup>2</sup>	175	542	1450	2260	2260	2350	3480	5800
17. $B_1/B$	1	2,98	7,55	8,9	6,45	4,2	3,3	2,76
18. $\Delta L$ , дБ	–	4,4	8,8	9,5	8,1	6,2	5,2	4,4

Расчетная точка находится на расстоянии  $r > r_{\text{пр}}$  от ближайшего станка, т. е. в зоне отраженного звука ( $r = 9,2$  м).

Необходимо выбрать конструкцию звукопоглощающей облицовки и определить снижение уровня звукового давления.

### Решение

Анализ представленного спектра уровней звукового давления показал, что конструкция облицовки должна иметь высокий коэффициент звукопоглощения и области частот 250 – 8000 Гц. Поэтому для облицовки может быть использован материал типа «Акмигран» или ПА/С (табл. 130).

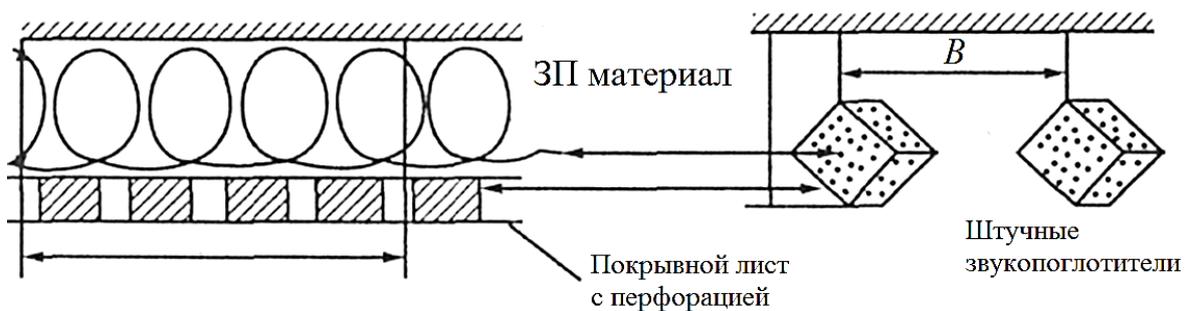
Найдем согласно п. 5 подразд. 8.4.1 постоянную  $B$  для помещения с объемом 3850 м<sup>3</sup> и по формулам (365) – (374) определим величину ожидаемого снижения уровней звукового давления в этой точке благодаря облицовке потолка ( $S_{\text{обл}} = 1100$  м<sup>2</sup>).

Для удобства проведения расчетов по формулам (365) – (374) разбиваем их на элементарные составные части и с учетом последовательности вычислений вводим их в пп. 2 – 18 табл. 129.

Таблица 130. Акустические характеристики звукопоглощающих материалов

Изделие или конструкция	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	Коэффициент звукопоглощения							
Плиты ПА/О, минераловатные, акустические. Размер 500 × 500	0,02	0,03	0,17	0,68	0,98	0,86	0,45	0,2
Винипор полужесткий	0,01	0,15	0,25	0,56	0,85	0,0	1,0	1,0
Плиты ПА/С, минераловатные, акустические. Размер 500 × 500	0,02	0,05	0,21	0,66	0,91	0,05	0,89	0,17
Плиты «АКМИГРАН», минераловатные, акустические. Размер 300 × 300	0,02	0,11	0,3	0,85	0,9	0,78	0,72	0,59
Маты из супертонкого стекловолокна, оболочка из стеклоткани ССТЭ-6	0,1	0,25	0,7	0,98	1,0	1,0	1,0	0,95
Минераловатная плита в стеклоткани с гипсовой плитой, перфорация по квадрату 13 %, Φ = 10 мм	0,1	0,31	0,7	0,95	0,69	0,59	0,5	0,3
Прошивные минераловатные плиты, гипсовая плита, перфорация по квадрату 13 %, Φ = 10 мм, размер 500 × 500	0,03	0,42	0,81	0,82	0,69	0,58	0,59	0,58
Отходы капронового волокна, распущенные, сетка из стеклоткани ССТЭ-6, металлический лист толщиной 1,2 мм, перфорация «шахматы», Φ = 13 мм	0,23	0,48	0,72	0,89	0,97	0,98	0,98	0,98
Супертонкое стекловолокно, стеклоткань Э-01, гипсовая плита, перфорация 13 %, Φ = 7 – 9 мм, толщина 7 мм	0,3	0,66	1,0	1,0	1,0	0,96	0,7	0,55

Изделие или конструкция	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	Коэффициент звукопоглощения							
Штучный поглотитель, размер $400 \times 400$ , $b = 2500$ мм, $h = 1200$ мм, металлический лист толщиной 2 мм, перфорация по квадрату 3 %, $\Phi = 10$ мм, внутри супертонкое волокно со стеклотканью Э-01	0,14	0,4	0,75	0,23	1,14	1,05	0,92	0,67
То же, но шаг расстановки $b = 1500$ мм	0,08	0,23	0,55	1,03	0,97	0,86	0,75	0,6
Каркас из фанеры, толщиной 3 мм, плиты ПА/С минераловатные, отделка набрызгом, размеры $500 \times 500$ , $b = 2500$ мм, $h = 1250$ мм	0,85	0,97	1,85	1,5	1,72	1,72	1,57	–



#### Пример 4

Задание: спроектировать звукоизолирующий кожух на электрическую машину (рис. 72). Машина электрическая и поэтому требует охлаждения, для этого в кожухе предусмотрены отверстия для циркуляции воздуха. Спектр звуковой мощности, излучаемой машиной, приведен в табл. 129. Габаритные размеры машины: длина 4 м, ширина 2 м, высота 2 м. Расчетная точка находится на расстоянии 1 м от поверхности машины.

## Решение

Определим требуемую эффективность кожуха по формуле (400).

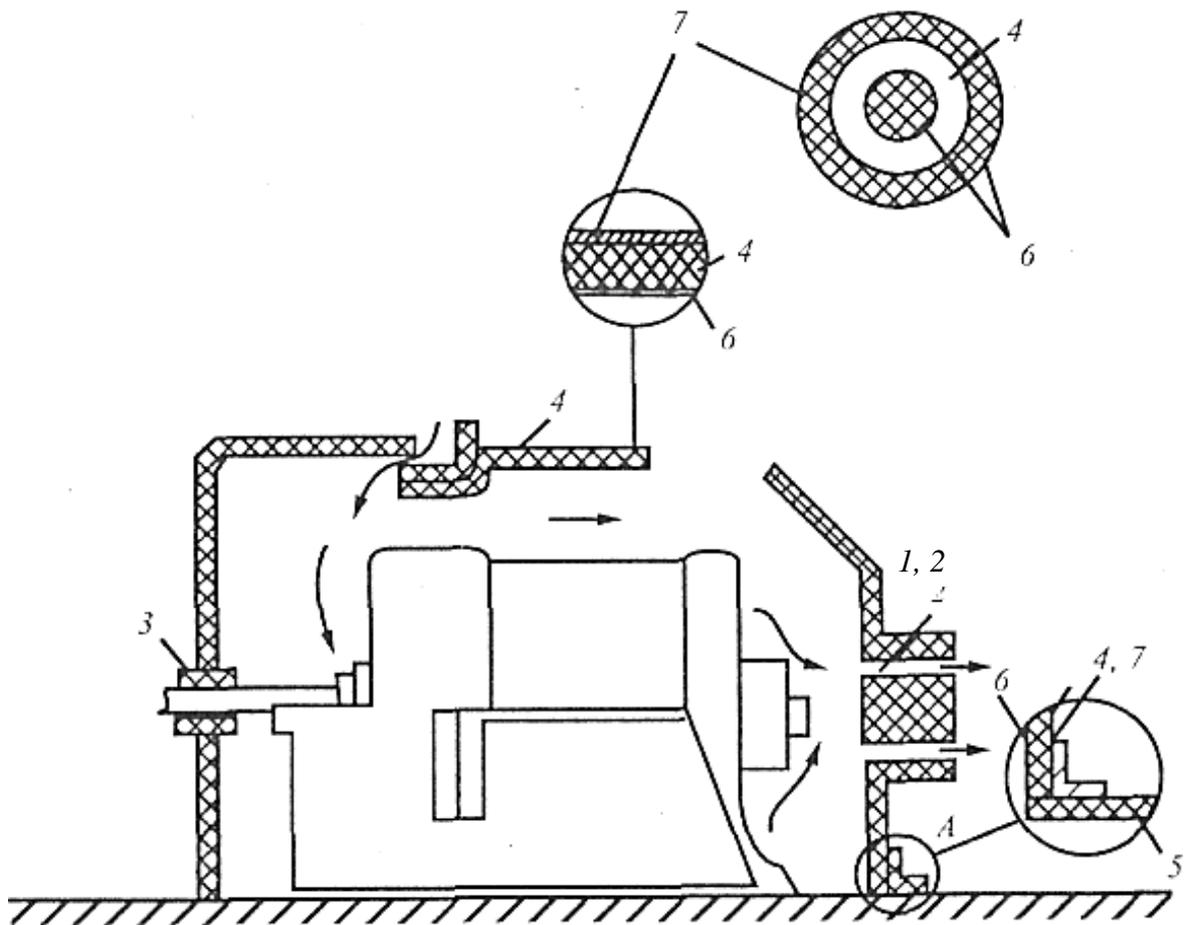


Рис. 72. Схема звукоизолирующего кожуха:

1, 2 – глушители в отверстиях для циркуляции воздуха; 3 – глушитель в отверстии для привода; 4 – звукопоглощающая облицовка; 5 – резиновая прокладка; 6 – перфорированный лист или сетка; 7 – металлический лист

Площадь воображаемой поверхности, окружающей источник и проходящей через расчетную точку,  $S = (6 \cdot 3) - 2 + \dots + (4 \cdot 3) - 2 + (6 \cdot 4) = 84 \text{ м}^2$ .

Допустимые уровни звукового давления принимаем по [31] (кривая ПС-85). Определим поверхность источника шума

$$S_{\text{ист}} = (2 \cdot 4)2 + (2 \cdot 2)2 + (2 \cdot 4) = 32 \text{ м}^2.$$

Из конструктивных соображений выбираем кожух с плоскими гранями. Допустим, что  $S_{\text{к}} = 65 \text{ м}^2$ . Затем по формуле (367) рассчитываем требуемую звукоизолирующую способность стенок кожуха. Расчет сводим в табл. 131.

Таблица 131. Результаты расчета

Параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1. $L_p$ , дБ	95	110	116	125	130	126	118	120
2. $L_{доп} = 1$ , дБ	103	96	91	88	85	83	81	80
3. $10\lg S$ ( $S = 84 \text{ м}^2$ )	19	19	19	19	19	19	19	19
4. $\Delta L_{эф.тр}$ , дБ	-7	-6	6	18	20	24	18	21
5. $10\lg S_k/S_{ист}$ , дБ	3	3	3	3	3	3	3	3
6. $R_{ктр}$ , дБ	-	-	9	21	29	11	21	24

Для кожуха из металла с ребрами жесткости (не реже  $1 \times 1 \text{ м}$ ) выбор конструкции стенок можно провести по табл. 132, стенки кожуха из стали должны быть толщиной 1 мм, из дюрала 2 мм. Глушители шума, через которые осуществляется доступ воздуха под кожух, встроенные в проемы кожуха, должны обладать эффективностью не ниже  $R_{ктр}$ . Глушители можно подобрать по [38]. Звукоизолирующая способность дверей и окон приведена в табл. 133.

Таблица 132. Звукоизолирующая способность стен и перегородок акустических однослойных конструкций и перекрытий, дБ

Материал конструкции	Толщина, мм	Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Кирпичная кладка, оштукатуренная с двух сторон	1/2 кирпич	220	32	39	40	42	48	54	60	60
		420	36	41	44	51	58	64	65	65
	1 кирпич 2 кирпич	820	45	45	52	59	65	70	70	70
Железобетонная плита	50	125	28	34	35	35	41	48	55	55
	160	400	-	43	47	51	60	63	-	-
	100	250	34	40	40	44	50	55	60	60
	200	500	40	42	44	51	59	65	65	65
	400	1000	45	47,5	55	61	67,5	70	70	70
Гипсобетонная плита	95	135	-	32	37	37	42	48	53	-
Газобетонная плита	240	270	-	39	42	51	56	54	52	-
Шлакобетонная панель	250	400	-	30	45	52	59	64	64	-

Окончание табл. 132

Материал конструкции	Толщина, мм	Поверхностная плотность, кг/м <sup>2</sup>	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Древесностружечная плита	20	12	–	23	26	26	26	26	26	23
	3	2,4	7	11	14	19	25	26	27	26
Фанера	5	4	9	13	17	21	25	28	26	29
	10	8	13	17	21	25	28	25	29	33
	3	5,1	9	13	17	21	25	29	31	32
Стеклопластик	5	8,5	12	16	20	24	28	31	38	34
	10	17	17	21	25	28	31	31	34	38
Сталь с панелями жесткости, размер ячеек между ребрами не более 1 × 1 м	1	7,8	13	17	21	25	28	32	36	35
	3	23,4	19	23	27	31	35	37	38	39
	5	39	39	22	26	30	34	37	32	36
	8	62,4	24	28	32	36	34	33	40	44
Железобетонная панель	120	300	–	42	45	51	58	58	–	–
То же, но с полами, древесностружечные плитки	3 20	323	–	37	42	51	58	58	58	–
Железобетонная панель	140	350	–	40	47	52	56	61	–	–
То же, но с полами Линолеум на войлочной основе	5	354	–	35	38	47	55	65	62	–
Линолеум на тканевой основе. Твердая древесноволокнистая плита	2	358	–	37	42	50	57	62	60	–
	4									
	8									
Паркетная клепка	14	364	–	40	42	51	58	59	53	–
Железобетонная плита с крупными пустотами	160	250	–	37	38	47	53	57	57	–
То же с полами, линолеум на мастике. Шлакобетонная панель	5 40	320	–	36	40	48	56	58	62	–
Железобетонная панель с круглыми пустотами и дощатым полом	220 37	325	–	45	48	51	54	56	57	–

Таблица 133. Звукоизолирующая способность дверей и окон, дБ

Конструкция	Условия прилегания по периметру	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Обыкновенная филенчатая дверь	Без уплотн. прокладки	7	12	14	16	22	22	20	–
	С уплотн. прокладкой	12	18	19	23	30	33	32	–
Глухая щитовая дверь ДБ-8 толщиной 40 мм, с двух сторон фанера толщиной 4 мм	Без уплотн. прокладки	17	22	23	24	24	24	24	–
	С уплотн. прокладкой	22	27	27	32	35	34	35	–
Типовая дверь П-327	Без уплотн. прокладки	–	13	23	31	33	34	36	44
	С уплотн. прокладкой	–	29	30	33	35	39	41	42
Щитовая дверь из твердых древесно- волокнистых плит толщиной 4 – 6 мм с воздушным зазором 50 мм со стекловатой	Без уплотн. прокладки	17	25	26	30	31	28	29	–
	С уплотн. прокладкой	23	28	30	33	36	32	30	–
Окно с силикатным стеклом толщиной: 3 мм 6 мм	Без уплот. прокладок	8	12	16	18	20	22	20	–
		12	18	18	20	23	25	25	–
Оконный блок с двойным перепле- том, толщина стекла 3 мм, воздушного зазора 170 мм	Без уплотн. прокладки	22	27	26	28	30	28	27	–
	С уплотн. прокладкой	27	33	33	36	38	38	38	–
Двойное остекление со стеклами толщи- ной 4 и 7 мм и воз- душным зазором: 200 мм 300 мм	С уплот. прокладками из резины	–	27	36	41	47	49	55	–
		–	32	39	43	47	51	55	–
Стеклоблоки типа БК-98 толщиной 98 мм	То же	–	37	40	42	45	48	50	–
Стекло силикатное толщиной: 4 мм 7 мм	С термоизоляцией притворов	–	19	24	28	30	33	31	–
		–	22	28	29	34	28	39	–

Конструкция	Условия прилегания по периметру	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Окно (размерами 1,0 × 1,2 м) толщиной: 4 мм 10 мм 18 мм	С термоизоляцией притворов								
		13	17	21	25	29	33	36	30
		18	23	26	31	34	34	32	40
Стеклопакеты из силикатного стекла толщиной 7 мм с воздушным промежутком: 4 мм 10 мм 18 мм	То же								
		–	15	26	30	36	40	40	–
		–	21	33	39	47	50	51	–
Стеклопакеты из силикатного стекла толщиной 7 мм с воздушным промежутком: 200 мм 650 мм	То же								
		–	32	41	43	51	52	58	–
		–	37	45	46	52	54	57	–

### 8.5. Расчет глушителей шума автотранспорта

Расчет глушителей включает три этапа: определение спектра уровней звуковой мощности шума впуска и выпуска двигателя без глушителя; расчет требуемого снижения шума этих источников в октавных полосах частот; расчет глушителей впуска и выпуска, обеспечивающих необходимое шумоглушение. В табл. 134 в качестве примера приведены ориентировочные значения уровней звуковой мощности в октавных полосах частот  $L_p$  шума впуска и выпуска без глушителей, а также шума, излучаемого поверхностью корпуса двигателя некоторых моделей автомобилей при измерениях по методике [33].

Таблица 134. Ориентировочные значения уровней звуковой мощности

Вид транспортного средства	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Шум впуска								
НИВА	96	110	108	105	103	98	94	90
PRIORA	92	112	106	105	108	101	96	90
КамАЗ-6560	98	113	110	103	105	99	97	93
Шум выпуска								
НИВА	103	123	124	123	122	116	116	110
PRIORA	99	126	127	119	116	120	117	106
КамАЗ-6560	108	115	125	120	120	115	105	100
Корпусной шум								
НИВА	82	90	95	102	102	99	94	92
PRIORA	80	100	98	100	102	103	98	95
КамАЗ-6560	82	100	103	103	104	100	95	86

Глушители впуска и выпуска проектируют в такой последовательности:

1. Определяем ожидаемые уровни звукового давления  $L$  незаглушенного впуска или выпуска двигателя в октавных полосах частот при испытаниях, дБ,

$$L = L_p - 20 \lg R + \text{ПН} - 8, \quad (375)$$

где  $R$  – расстояние от измерительного микрофона до проезжающего транспортного средства ( $R \approx 7,5$ );

ПН – показатель направленности излучения шума на впуске и выпуске двигателя (ПН  $\approx 0$ ).

2. Исходя из допустимого уровня общего шума транспортного средства  $L_{\text{Адоп}}$  находим допустимые уровни звукового давления в каждой октавной полосе частот

$$L_{\text{доп}} = L_{\text{Адоп}} - 10 \lg m + \Delta_A, \text{ дБ}, \quad (376)$$

где  $L_{\text{Адоп}}$  определяем по [33], например, для легковых автомобилей  $L_{\text{Адоп}} = 82$  дБА; для грузовых автомобилей и автобусов 84, 89 или 91 дБА в зависимости от массы транспортного средства и мощности двигателя; для мотоциклов – 82, 84, 85 или 86 дБА в зависимости от рабочего объема двигателя;

$m$  – число октавных полос, принимаемых в расчет;

$\Delta_A$  составляет 26, 16, 9, 3, 0, -1, -1 и 1 дБ соответственно при 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц.

3. Определяем требуемое снижение октавных уровней звукового давления шума впуска и выпуска, дБ,

$$\Delta L_{\text{тр}} = L - L_{\text{доп}} + 10 \lg n, \quad (377)$$

где  $n$  – количество основных источников шума транспортного средства, обычно  $n = 3$ .

Если рассчитанная  $\Delta L_{\text{тр}}$  окажется отрицательной, то ее следует брать равной нулю.

4. Выбираем принципиальную схему построения глушителей.

Глушитель впуска должен содержать воздухофильтр, который является одновременно шумоглушающим элементом с последовательной фрикцией. Его следует располагать на входе воздуха в глушитель. Кроме него в схему глушителя могут быть включены реактивные элементы: резонаторные – параллельно и камерные – последовательно воздушному потоку. Камерный элемент целесообразно размещать на выходе воздуха из глушителя. Иногда для повышения эффективности на средних и высоких частотах применяют абсорбционные элементы глушения с параллельной фрикцией.

Глушитель выпуска представляет собой комбинацию камерных и резонаторных элементов шумоглушения, настроенных таким образом, чтобы их области заглушения перекрывали весь частотный диапазон требуемого снижения шума.

Таким образом, любые по сложности глушители могут быть синтезированы из типовых элементов шумоглушения: абсорбционных – с последовательной или параллельной фрикцией и реактивных – камерного или резонаторного типа.

5. Определяем акустическую эффективность типовых элементов глушителя:

а) эффективность абсорбционного элемента с последовательной фрикцией ориентировочно можно определить по формуле, дБ,

$$\Delta L = 20 \lg(\Delta H_{\Sigma} / \Delta H), \quad (378)$$

где  $\Delta H_{\Sigma}$  – суммарное падение давления в глушителе, содержащем абсорбционный элемент, Па;

$\Delta H$  – падение давления в глушителе без абсорбционного элемента, Па;

б) эффективность абсорбционного элемента с параллельной фрикцией приближенно рассчитывается по выражению, дБ,

$$\Delta L = 1,1Pl\varphi(\alpha)/F, \quad (379)$$

где  $P$  и  $F$  – периметр, м, и площадь,  $m^2$ , проходного сечения канала, облицованного звукопоглощающим материалом;

$l$  – длина облицованного участка канала, м;

$\varphi(\alpha)$  равна 0,5; 0,65; 0,9; 1,2; 1,6; 2; 4 при соответствующих значениях коэффициента звукопоглощения облицовки  $\alpha$  0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1;

в) акустическую эффективность реактивных элементов определяем исходя из теории линейной акустики для частотного диапазона существования плоских волн. Этот диапазон для элементов круглого сечения ограничен частотой, Гц,

$$f_{гр} = 0,586c/D, \quad (380)$$

где  $c = 20,04\sqrt{T}$  – скорость звука в шумоглушащем элементе, м/с;

$T$  – температура газов, К;

$D$  – наибольший диаметр элемента, м.

Пренебрегаем влиянием скорости газового потока и считаем полным отражение волн от открытого конца выходного канала шумоглушащего элемента. При этих допущениях эффективность камерного элемента, изображенного на рис 73, а, рассчитывается по формуле, дБ,

$$\Delta L = 10 \lg(\sin^4\gamma \cdot l_T \cdot \sin^2\gamma \cdot l_2 \{ [A(l - \mu \cdot \text{ctg}\gamma \cdot l_T \cdot \text{tg}\gamma \cdot l_1) + \\ + B(\mu - 1)\text{ctg}\gamma \cdot l_T \cdot \text{ctg}\gamma \cdot l_3]^2 + [A(\mu \cdot \text{tg}\gamma \cdot l_1 + \text{ctg}\gamma \times \\ \times l_T) - B(\mu - 1)\text{ctg}\gamma \cdot l_3]^2 \}), \quad (381)$$

где

$$A = \text{ctg}\gamma \cdot l_3 - \left(\frac{\mu}{\mu - 1}\right) \text{tg}\gamma \cdot l_2 + \left(\frac{\mu}{\mu - 1}\right) \text{ctg}\gamma \cdot l_T, \quad (382)$$

$$B = \left(\frac{\mu}{\mu - 1}\right) \text{ctg}\gamma \cdot l_T - \left(\frac{\mu}{\mu - 1}\right) \text{tg}\gamma \cdot l_2 - \text{ctg}\gamma \cdot l_3, \quad (383)$$

$$\gamma = \frac{2\pi f}{c}, \quad (384)$$

$$\mu = \frac{(S_K - S_T)}{S_T}, \quad (385)$$

где  $f$  – частота звука, Гц;

$S_K$  и  $S_T$  – площади поперечного сечения камеры и трубопроводов. Остальные обозначения указаны на рисунке.

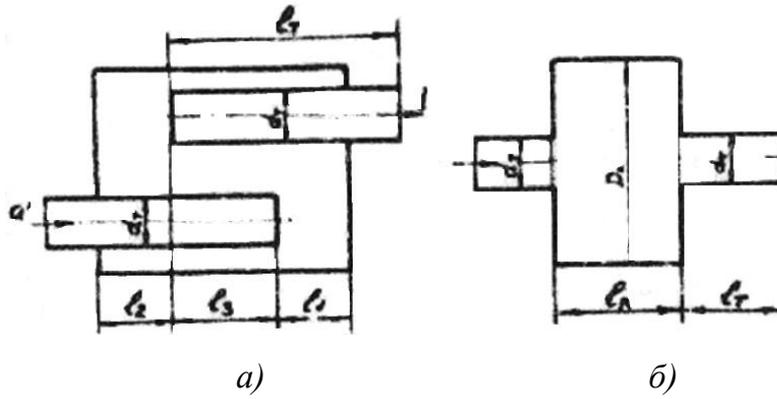


Рис. 73. Камерные шумоглушащие элементы

Высокие результаты шумоглушения получаются при условии, что  $l_1 = l_2 = l, l_3 = 0$  и  $L_T = 2l$ .

Тогда, дБ;

$$\Delta L = 10 \lg [(1 - \mu \cdot \sin^4(\gamma l) \operatorname{tg} \gamma \cdot l)^2 + (2\mu \cdot \sin^2(2\gamma l) \operatorname{tg} \gamma \cdot l)^2]; \quad (386)$$

г) эффективность камерного элемента, представленного на рис. 73, б, рассчитаем по формуле, дБ,

$$\Delta L = 10 \lg \left\{ 0,25 \sin^2(2\gamma l_T) \sin^2(\gamma l_K) \left[ \frac{1}{m} - m + \operatorname{ctg} \gamma \cdot l_K \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \operatorname{ctg} \gamma \cdot l_T + \operatorname{tg} \gamma \cdot l_T \cdot \operatorname{ctg} \gamma \cdot l_K \right]^2 + \left( m \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot l_T + \frac{1}{m \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot l_T} \right) \right\}, \quad (387)$$

где  $m = S_K/S_T$ . Остальные обозначения указаны на рисунке.

Наиболее широкая полоса заглушения достигается при  $l_K = l_T = l$ . В этом случае, дБ,

$$\Delta L = 10 \lg \left[ \left( \frac{m+1}{2} \cos(2\gamma l) - \frac{m-1}{2} \right)^2 + \left( \frac{m+1}{2m} \sin(2\gamma l) \right)^2 \right]; \quad (388)$$

д) эффективность реактивного элемента резонаторного типа (рис. 74) рассчитываем по формуле, дБ,

$$\Delta L = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{KV}{\left[ 2F \left( \frac{f}{f_p} - \frac{f_p}{f} \right) \right]^2} \right\}, \quad (389)$$

где  $K$  – проводимость горла резонатора;

$V$  – объем резонаторной камеры;

$F$  – площадь проходного сечения трубопровода;

$f_p$  – резонансная частота.

$$f_p = \left(\frac{c}{2\pi}\right) \sqrt{\frac{K}{V}}, \text{ Гц.} \quad (390)$$

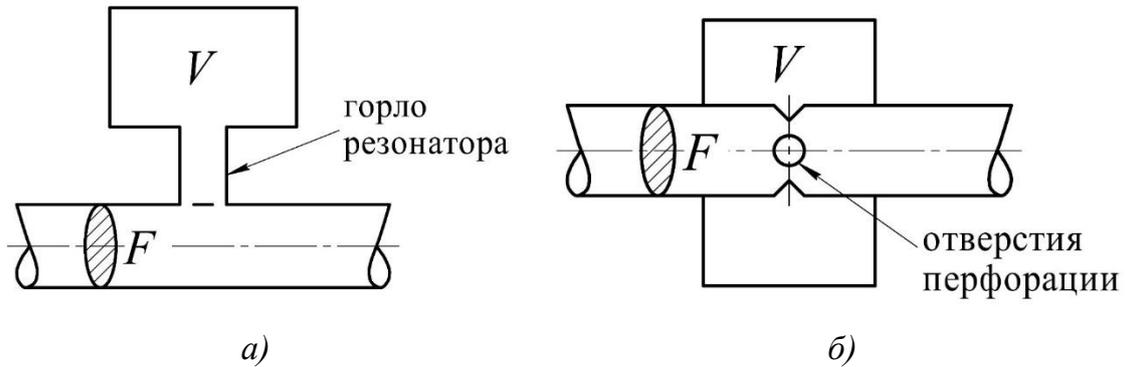


Рис. 74. Резонаторные шумоглушающие элементы

Для ответвленного резонатора (рис. 74, а)

$$K = \frac{S}{l + \frac{\pi d_1}{4}}, \quad (391)$$

где  $d_1$ ,  $l$  и  $S$  – диаметр, длина и площадь проходного сечения горла резонатора.

Для кольцевого резонатора (рис. 74, б)

$$K = \frac{\pi d^2 n_0}{4\delta + \frac{\pi d}{\varphi\left(\frac{d}{a}\right)}}, \quad (392)$$

где  $n_0$  и  $d$  – количество и диаметр отверстий перфорации;

$\delta$  – глубина отверстий (толщина стенки трубопровода);

$a$  – расстояние между центрами соседних отверстий перфорации.

$$\varphi\left(\frac{d}{a}\right) = \left[1 - 1,41\left(\frac{d}{a}\right) + 0,38\left(\frac{d}{a}\right)^3 + 0,068\left(\frac{d}{a}\right)^5\right]^{-1}, \quad (393)$$

6. Находим суммарную акустическую эффективность глушителя на заданной частоте, дБ,

$$\Delta L_\Sigma = \sum_{i=1}^N \Delta L_i, \quad (394)$$

где  $\Delta L_i$  – акустическая эффективность  $i$ -го элемента шумоглушения на данной частоте, которая может быть определена по одной из формул (378) – (393);

$N$  – количество элементов, входящих в состав глушителя.

7. Проверяем в каждой полосе частот выполнение условия, дБ,

$$\Delta L_{\Sigma} \geq \Delta L_{\text{тр}}. \quad (395)$$

Если в каком-либо частотном диапазоне соотношение (395) не выполняется, то, варьируя размерами и количеством шумоглушающих элементов, добиваемся необходимого увеличения акустической эффективности на этих частотах согласно формулам (378) – (394).

Например, для повышения эффективности камерных элементов следует в первую очередь увеличивать параметры  $\mu$  и  $m$  (381) – (388).

При использовании резонаторных элементов следует увеличивать  $K$  и  $V$  и уменьшать  $F$  (389).

### **8.6. Расчет шума, создаваемого струей реактивного двигателя**

Цель расчета – определить октавные уровни звукового давления, создаваемые струей газа на рабочем месте. Однако расчет необходимо начинать с определения звуковой мощности источника, которая позволяет объективно оценивать шумность рассматриваемого источника шума по сравнению с другими аналогичными устройствами.

Параметры, определяющие интенсивность звукового излучения на данной частоте: скорость истечения газа на срезе сопла  $V$ , м/с; диаметр сопла  $d$ , м; угол  $\Theta$ , измеряемый между осью струи и линией ОА, где точка А является точкой наблюдения. Кроме того, оказывают влияние параметры окружающей среды, в которую происходит истечение, наличие твердых границ вблизи струи и другие, что делает задачу достаточно сложной. Однако основным параметром, определяющим характер излучения шума, следует считать скорость истечения  $V$  или в более общем виде – число Маха на срезе сопла

$$M = V/a_c, \quad (396)$$

где  $a_c$  – скорость звука в струе. Для оценки суммарной звуковой мощности  $P_{\Sigma}$  свободной струи при различных скоростях истечения газа можно рекомендовать следующие зависимости, Вт,

для чисел  $M < 0,12$

$$P_{\Sigma} = k \frac{\rho_c v^4}{a_0} d^2, \quad (397)$$

для  $M = 0,12 - 0,5$

$$P_{\Sigma} = k \frac{\rho_c^2 v^6}{\rho_0 d_0^3} d^2, \quad (398)$$

для  $M = 0,5 - 0,2$

$$P_{\Sigma} = k \frac{\rho_c^2 v^8}{\rho_0 d_0^5} d^2, \quad (399)$$

для  $M > 2$

$$P_{\Sigma} = k \frac{\rho_c^2 v^3}{\rho_0} d^2. \quad (400)$$

В формулах (397) – (400)  $\rho_c$  – плотность газа в струе, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – плотность окружающей среды, кг/м<sup>3</sup>;

$k$  – экспериментальный коэффициент пропорциональности, который можно применять для формулы (397)  $k = 10^{-7}$ ; для (398)  $k = 10^{-5}$ ; для (399)  $k = 3 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-4}$  и для (400)  $k = (0,5 - 1) \times 10^{-2}$ . При этом меньшее значение коэффициента  $k$  соответствует холодным, модельным струям, большее значение – струям реактивных двигателей.

Суммарный уровень звуковой мощности определяется по формуле, дБ,

$$L_{P_{\Sigma}} = 10 \lg P_{\Sigma} + 120. \quad (401)$$

Для звуковых сопел определение величины  $P_{\Sigma}$  проводится по формуле (398). При этом если перепад давления на срезе сопла превышает критический (т. е.  $P_c = P_c/P_0 > 1,89$ , где  $P_c$  – полное давление в струе на срезе сопла;  $P_0$  – давление окружающей среды), следует уточнить величину  $P_{\Sigma}$  по формуле, Вт,

$$P_{\Sigma_1} = k_1 P_{\Sigma}. \quad (402)$$

Здесь коэффициент  $k_1$  находится по табл. 135. Найденную таким образом величину  $P_{\Sigma_1}$  подставляют затем в формулу (401).

Для перехода от звуковой мощности к суммарному уровню звукового давления  $L_{\Sigma}$  на конкретном рабочем месте следует учитывать показатель направленности излучения (ПН) (табл. 136), зависящий от угла  $\Theta$  и температуры струи  $T$ . Вычисления проводятся по формуле

$$L_{\Sigma} = L_{P_{\Sigma}} - \psi - 20 \lg R + \text{ПН}, \quad (403)$$

где  $R$  – расстояние от точки  $O$  до расчетной точки, м ( $R = OA$ );  $\psi = 8$  дБ при излучении в полусфере и  $\psi = 11$  дБ при излучении в сферу.

Формула (403) пригодна для расчетов в свободном звуковом поле.

Обобщенные спектры уровней звуковых давлений в третьоктавных полосах частот приведены в табл. 137. Среднегеометрические частоты для полос даны в табл. 138. Соотношение между параметрами  $\Delta L$  и  $\Delta$  приведено в табл. 139, соотношение между параметрами  $\bar{f}$  и  $L_H$  – в табл. 140. Зависимость основных параметров от октавных частот находим в табл. 141.

Таблица 135. Зависимость коэффициента  $K_1$  от перепада давлений на сопле  $P_c$  и температуры струи  $T$

$P_c$	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
$K_1$ ( $T = 500K$ )	0	10	20	40	51	75	100	125	150	175	200	225	250
$K_1$ ( $T = 500^\circ$ )	0	5	10	15	20	25	35	40	50	55	65	70	75
$K_1$ ( $T = 100^\circ$ )	0	5	7	10	15	20	21	23	25	27	30	32	35
$K_1$ ( $T = 900^\circ$ )	0	5	7	7	10	10	11	12	15	17	20	21	23

Таблица 136. Показатель направленности суммарного шума

$\Theta$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
ПН ( $K = 288$ )	4	5	4	2,5	0	-2	-4	-5	-6	-5	-2,5
ПН ( $K = 800$ )	2,5	5	7	2,5	0	-2,5	-5	-6,5	-7,5	-9	-10
ПН ( $K = 1000$ )	5,5	6	7	5	0	-2,5	-6	-8	-10	-12	-13

Таблица 137. Обобщенные спектры уровней звуковых давлений в третьоктавных полосах частот, дБ

	$Sh$	4	6	8	$10^{-1}$	2	4	6	8	$10^0$	2	4
$\Delta L = L_i - L_\Sigma$	<i>I</i>	-24	-18	-14	-10	-7	-9	-12	-13	-15	-19	-25
	<i>II</i>	-27	-25	-23	-20	-17	-13	-12	-11	-12	-13	-17

Таблица 138. Среднегеометрические частоты для полос, Гц

Октавных, $f$	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Третьоктавных, $f$	50	100	200	400	800	1600	3150	6300
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	80	160	315	630	1250	2500	5000	10000

Таблица 139. Соотношение между  $\Delta L$  и  $\Delta$

$\Delta L$ , дБ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
$\Delta$ , дБ	3	2,5	2	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0

Таблица 140. Соотношение между  $\bar{f}$  и  $L_H$

$\bar{f}$	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_H$	83	74	68	63	60	57	55	54

Таблица 141. Зависимость основных параметров от октавных частот, Гц

Октавные частоты	Третьоктавные частоты	$Sh$	$\Delta L_i$	$L_i$	$L_{\text{окт}}$	$L_H$	$L_H+3U_{\min}$
63	50	$1,17 \cdot 10^{-2}$	-39	104,5	111,5	83	143
	63	$1,49 \cdot 10^{-2}$	-37	106,5			
	80	$1,87 \cdot 10^{-2}$	-35	108,5			
125	100	$2,33 \cdot 10^{-2}$	-33	110,5	117,5	74	134
	125	$2,9 \cdot 10^{-2}$	-31	112,5			
	160	$3,72 \cdot 10^{-2}$	-29	114,5			
250	200	$4,67 \cdot 10^{-2}$	-27	116,5	123,5	68	128
	250	$5,81 \cdot 10^{-2}$	-25	118,5			
	315	$7,31 \cdot 10^{-2}$	-23	120,5			
500	400	$9,7 \cdot 10^{-2}$	-21	122,5	129,1	63	123
	500	$1,16 \cdot 10^{-1}$	-19,5	124			
	630	$1,47 \cdot 10^{-1}$	-18	125,5			
1000	800	$1,87 \cdot 10^{-1}$	-16,5	127	133,2	60	120
	1000	$2,33 \cdot 10^{-1}$	-15	128,5			
	1250	$2,91 \cdot 10^{-1}$	-14	129,5			
2000	1600	$3,73 \cdot 10^{-1}$	-13	130,5	136,4	57	117
	2000	$4,66 \cdot 10^{-1}$	-12	131,5			
	2500	$5,83 \cdot 10^{-1}$	-11	132,5			
4000	3150	$7,31 \cdot 10^{-1}$	-10,5	133	137,4	55	115
	4000	$9,7 \cdot 10^{-1}$	-11	132,5			
	5000	1,16	-11	132,5			
8000	6300	1,47	-11,5	132	136	54	114
	8000	1,87	-12	131,5			
	10000	2,33	-13	130,5			

## 8.7. Акустический расчет системы вентиляции

Ожидаемые уровни звукового давления шума, излучаемого через вентиляционную решетку, определяются по формуле

$$L = L_p - \Delta L_p + 10 \lg \left( \frac{\Phi}{\Omega r^2} + \frac{4}{B} \right), \quad (404)$$

где  $L_p$  – октавный уровень звуковой мощности, излучаемой вентилятором в канал:

$$L_p = L_{p\text{общ}} - \Delta L_1 + \Delta L_2, \quad (405)$$

где  $L_{p\text{общ}}$  – общий уровень звуковой мощности вентилятора, определяемый по формуле

$$L_{p\text{общ}} = \tau + 25 \lg H + 10 \lg Q, \quad (406)$$

где  $\tau$  – критерий шумности;

$\Delta L_1$  – поправка, учитывающая распределение звуковой мощности по октавным полосам, принимается по табл. 142;

$\Delta L_2$  – поправка, учитывающая влияние присоединения вентилятора к сети воздуховодов, принимается по табл. 143;

$\Delta L_p$  – суммарное снижение уровня звуковой мощности на пути распространения шума от вентилятора до жалюзийной решетки, из которой излучается шум. Величина  $\Delta L_p$  состоит из следующих составляющих: снижения  $\Delta L_p$  на прямых участках металлического воздуховода, определяемого по табл. 144; снижения  $\Delta L_p$  в плавном повороте воздуховода, определяемого по данным табл. 145; снижения  $\Delta L_p$  в разветвлении воздуховода, рассчитываемого по формуле

$$\Delta L_p = 10 \lg \frac{\sum F_{\text{отв}} (m + 1)^2}{F_{\text{отв}i} \cdot 4m}, \quad (407)$$

где  $\sum F_{\text{отв}}$  – суммарная площадь поперечных сечений всех ответвлений,  $\text{м}^2$ ;

$F_{\text{отв}i}$  – площадь поперечного сечения воздуховода за ответвлением,  $\text{м}^2$ ;

$m = F / \sum F_{\text{отв}}$  – отношение площади поперечного сечения воздуховода  $F$  перед разветвлением к  $\sum F_{\text{отв}}$ .

Снижение  $\Delta L_p$  в результате отражения звука от жалюзийной решетки определяется по табл. 146.  $\Phi$  – фактор направленности источника шума;  $\Omega$  – пространственный угол излучения;  $B$  – постоянная помещения, определяемая по формуле

$$B = B_{1000} \cdot \mu, \quad (408)$$

где  $V_{1000}$  – постоянная помещения,  $\text{м}^2$ , на частоте 1000 Гц, определяемая по табл. 147 в зависимости от объема  $V$ ,  $\text{м}^3$ , и типа помещения;  
 $\mu$  – частотный множитель (табл. 148).

Требуемое снижение шума  $\Delta L_{\text{тр}}$  рассчитывается по формуле

$$\Delta L_{\text{тр}} = L - L_{\text{доп}}, \quad (409)$$

где  $L$  – рассчитанный по формуле (404) уровень звукового давления;

$L_{\text{доп}}$  – допустимый уровень звукового давления.

*Таблица 142.* Значения поправки  $\Delta L_1$ , учитывающей распределение звуковой мощности по октавным полосам

Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц	$\Delta L_1$ для вентилятора, дБ
63	15
125	11
250	7
500	5
1000	6
2000	9
4000	16
8000	21

*Таблица 143.* Значения поправки  $\Delta L_2$ , учитывающей влияние присоединения вентилятора к сети воздуховодов, дБ

Корень квадратный из площади патрубка вентилятора, мм	Среднегеометрическая частота, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
200	18	13	8	3	1	0	0	0

*Таблица 144.* Величина снижения уровня звуковой мощности  $\Delta L_p$  на прямых участках металлического воздуховода, дБ

Гидравлический диаметр прямоугольного воздуховода, мм	Снижение уровня звуковой мощности на 1 м длины воздуховода на среднегеометрической частоте октавной полосы, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
75 – 200	0,6	0,6	0,45	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
210 – 400	0,6	0,6	0,45	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
410 – 800	0,6	0,6	0,3	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
810 – 1600	0,45	0,3	0,15	0,1	0,06	0,06	0,06	0,06

Таблица 145. Величина снижения уровня звуковой мощности  $\Delta L_p$  в плавном повороте воздуховода, дБ

Ширина поворота, мм	Снижение уровня звуковой мощности на повороте воздуховода на среднегеометрической частоте октавной полосы, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
125 – 250	0	0	0	0	1	2	3	3
260 – 500	0	0	0	1	2	3	3	3
510 – 1000	0	0	0	1	2	3	3	3

Таблица 146. Величина снижения уровня звуковой мощности  $\Delta L_p$  в результате отражения звука от жалюзийной решетки, дБ

Диаметр воздуховода или корень квадратный из площади поперечного сечения конца прямоугольного воздуховода или решетки, мм	Снижение уровня звуковой мощности, дБ, при среднегеометрической частоте октавной полосы, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
25	24	22	19	15	10	6	2	0
50	22	19	15	10	5	2	0	0
80	20	16	11	7	3	0	0	0
100	19	14	10	5	2	0	0	0
125	18	13	8	4	1	0	0	0
140	16	12	8	4	1	0	0	0
160	16	11	7	3	0	0	0	0
180	15	11	6	2	0	0	0	0
200	14	10	6	2	0	0	0	0
225	14	9	15	1	0	0	0	0
250	13	8	4	1	0	0	0	0
280	12	8	3	1	0	0	0	0
315	11	7	3	0	0	0	0	0
355	11	6	2	0	0	0	0	0
400	10	5	2	0	0	0	0	0
450	8	5	1	0	0	0	0	0
500	8	4	1	0	0	0	0	0
560	8	3	1	0	0	0	0	0
600	7	3	1	0	0	0	0	0
710	6	2	0	0	0	0	0	0
800	5	2	0	0	0	0	0	0
900	5	2	0	0	0	0	0	0
1000	4	1	0	0	0	0	0	0
1250	3	0	0	0	0	0	0	0
1400	2	0	0	0	0	0	0	0
1600	2	0	0	0	0	0	0	0
2000	1	0	0	0	0	0	0	0
2500	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 147. Значения постоянной помещения

Описание помещения	Постоянная помещения $V_{1000}$ , м <sup>2</sup>
С небольшим количеством людей (металлообрабатывающие цехи, вентиляционные камеры, генераторные, машинные залы, испытательные стенды и т. п.)	$\frac{V}{20}$
С жесткой мебелью и большим количеством людей или с небольшим числом людей и мягкой мебелью (лаборатории, ткацкие и деревообрабатывающие цехи, кабинеты и т. п.)	$\frac{V}{10}$
С большим количеством людей и мягкой мебелью (рабочие помещения зданий, управлений, залы конструкторских бюро, аудитории учебных заведений, залы ресторанов, торговые залы магазинов, залы ожидания аэропортов и вокзалов, номера гостиниц, классные помещения в школах, читальные залы библиотек, жилые помещения и т. п.)	$\frac{V}{6}$
Помещения со звукопоглощающей облицовкой стен, потолка и части стен	$\frac{V}{1,5}$

Таблица 148. Значения частотного множителя

Объем помещения $V$ , м <sup>3</sup>	Частотный множитель $\mu$ на среднегеометрических частотах октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$V < 200$	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
$V = 200 - 1000$	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
$V > 1000$	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6

### Контрольные вопросы

1. Что такое звуковое давление и в каких единицах оно измеряется?

2. Сформулируйте понятие «колебательная скорость». В каких единицах она измеряется?
3. Охарактеризуйте интенсивность акустического поля. В каких единицах она измеряется?
4. Раскройте понятие мощности излучения акустического поля. В каких единицах она измеряется?
5. Что такое плотность энергии звуковых волн и в каких единицах она измеряется?
6. Что такое уровень шума и в каких единицах он измеряется?
7. Какие методы защиты от шума применяют на производстве?
8. Что такое коэффициент звукопоглощения?
9. За счет каких мероприятий осуществляется снижение шумового фона транспортных потоков в жилой застройке городов?
10. Что является источниками внешнего звука в городах?
11. Какие октавные полосы частот шума используют в расчетах?
12. По какой формуле определяются ожидаемые уровни звукового давления шума, излучаемого через вентиляционную решетку?
13. Каким нормативным документом регламентируется шум?

## Глава 9. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

### 9.1. Общие понятия. Техническое нормирование

Характер воздействия электромагнитных полей (ЭМП) на человека в основном зависит от величины напряженности ЭМП; плотности потока; мощности источника; частоты колебания; времени действия ЭМП.

Переменное электрическое поле вызывает переменную поляризацию диэлектриков и появление токов проводимости, что приводит к перегреву тела человека. Кроме того, ЭМП могут вызвать рак крови, помутнение хрусталика, нервные расстройства и др.

Биологическая активность волн возрастает с уменьшением их длины. Поэтому при малых длинах волн или большой частоте предусматривается снижение допустимой напряженности ЭМП.

В настоящий момент на территории Российской Федерации действуют нормативные документы, регламентирующие ПДУ электромагнитного неионизирующего излучения в радиочастотном диапазоне, создаваемого техническими средствами радиосвязи, радиовещания и телевидения по [31, 34 – 39].

В табл. 149 представлены гигиенические нормы для персонала, работающего на электроустановках с токами промышленной частоты (50 Гц) и напряжением 400 кВ и выше.

При напряженности электрического поля на рабочем месте свыше 25 кВ/м или продолжительности пребывания человека в электрическом поле, не соответствующей данным табл. 149, работающим должны выдаваться средства защиты.

В табл. 150 – 155 приведены нормы электромагнитных излучений радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ).

*Таблица 149.* Гигиенические нормы для персонала, работающего на электроустановках с токами промышленной частоты (50 Гц) и напряжением 400 кВ и выше

Напряженность электрического поля, кВ/м	Допустимое время пребывания человека в электрическом поле
5	В течение рабочего дня
5 – 20	$T = \frac{50}{E} - 2$ , ч, где $E$ – напряженность электрического поля, кВ $T$ – время пребывания, ч
20 – 25	10 мин

Таблица 150. Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

Диапазон частот	Предельно допустимая энергетическая экспозиция		
	По электрической составляющей, $(В/м)^2 \cdot ч$	По магнитной составляющей $(А/м)^2 \cdot ч$	По плотности потока энергии $(мкВт/см^2) \cdot ч$
30кГц – 3МГц	20000,0	200,0	–
3 – 30 МГц	7000,0	Не разработаны	–
30 – 50 МГц	800,0	0,72	–
50 – 300 МГц	800,0	Не разработаны	–
300 МГц – 300 ГГц	–	–	200,0

*Примечание.* В настоящих Санитарных нормах и правилах во всех случаях при указании диапазонов частот каждый диапазон исключает нижний и включает верхний предел частоты.

Таблица 151. Предельно допустимые уровни напряженности электрической и магнитной составляющих в диапазоне частот 30 кГц – 300 МГц в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия $T, ч$	$E_{пду}, В/м$			$H_{пду}, А/м$	
	0,03 – 3 МГц	3 – 30 МГц	30 – 300 МГц	0,03 – 3 МГц	30 – 50 МГц
8,0 и более	50	30	0	5,0	0,30
7,5	52	31	0	5,0	0,31
7,0	53	32	1	5,3	0,32
6,6	55	33	1	5,5	0,33
6,0	58	34	2	5,8	0,34
5,5	60	35	2	6,0	0,36
5,0	63	37	3	6,3	0,38
4,5	67	39	3	6,7	0,40
4,0	71	42	14	7,1	0,42
3,5	76	45	15	7,6	0,45
3,0	82	48	16	8,2	0,49
2,5	89	52	18	8,9	0,54
2,0	100	59	20	10,0	0,60
1,5	115	68	23	11,5	0,69
1,0	141	84	28	14,2	0,85
0,5	200	118	40	20,0	1,20
0,25	283	168	57	28,3	1,70
0,125	400	236	80	40,0	2,40
0,08 и менее	500	296	80	50,0	3,00

*Примечание.* При продолжительности воздействия менее 0,08 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

**Таблица 152.** Предельно допустимые уровни плотности потока энергии в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия $T$ , ч	ППЭ <sub>пду</sub> , мкВт/см <sup>2</sup>	Продолжительность воздействия $T$ , ч	ППЭ <sub>пду</sub> , мкВт/см <sup>2</sup>	Продолжительность воздействия $T$ , ч	ППЭ <sub>пду</sub> , мкВт/см <sup>2</sup>
8,0 и более	25	5,0	40	2,0	100
7,5	27	4,5	44	1,5	133
7,0	29	4,0	50	1,0	200
6,5	31	3,5	57	0,5	400
6,0	33	3,0	67	0,25	800
5,5	36	2,5	80	0,20 и менее	1000

*Примечание.* При продолжительности воздействия менее 0,2 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

**Таблица 153.** Предельно допустимые уровни ЭМИ РЧ для населения, лиц, не достигших 18 лет, и женщин в состоянии беременности

Назначение помещений или территории	Диапазон частот				
	30 – 300 кГц	0,3 – 3 МГц	3 – 30 МГц	30 – 300 МГц	300 МГц – 300 ГГц
	Предельно допустимые уровни ЭМИ РЧ				
	В/м	В/м	В/м	В/м	мкВт/см <sup>2</sup>
Территория жилой застройки и мест массового отдыха: помещения жилых, общественных и производственных зданий (внешнее ЭМИ РЧ, включая вторичное излучение)	–	–	–	–	10,0
Рабочие места лиц, не достигших 18 лет, и женщин в состоянии беременности	25,0	15,0	10,0	3,0+	100,0++

*Примечание.* + – кроме телевизионных станций и радиолокационных станций, работающих в режиме кругового обзора или сканирования; ++ – для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования.

**Таблица 154.** Предельно допустимые уровни ЭМИ РЧ, создаваемых телевизионными станциями

Частота, МГц	ПДУ, В/м
48,4	5,0
88,4	4,0
192,0	3,0
300,0	2,5

Таблица 155. Международная классификация электромагнитных волн по частотам

Диапазон радиочастот	Границы диапазона	Диапазон радиочастот	Границы диапазона
Крайне низкие, КНЧ	3 – 30 Гц	Высокие частоты, ВЧ	3 – 30 МГц
Сверхнизкие, СНЧ	30 – 300 Гц	Очень высокие, ОВЧ	30 – 300 МГц
Инфракрасные, ИНЧ	0,3 – 3 кГц	Ультравысокие, УВЧ	0,3 – 3 ГГц
Очень низкие, ОНЧ	3 – 30 кГц	Сверхвысокие, СВЧ	3 – 30 ГГц
Низкие, НЧ	30 – 300 кГц	Крайне высокие, КВЧ	30 – 300 ГГц
Средние, СЧ	0,3 – 3 МГц	Гипервысокие, ГВЧ	300 – 3000 ГГц

## 9.2. Природные источники электромагнитных полей

По происхождению природные источники ЭМП делятся на две группы:

1. Поле Земли: постоянное электрическое и основное (или постоянное) магнитное поле.

2. Радиоволны, генерируемые космическими источниками (Солнце, галактики и пр.), при некоторых процессах, происходящих в атмосфере Земли (например, разряды молнии), при возбуждении колебаний в ионосфере Земли.

Естественное электрическое поле Земли создается избыточным отрицательным зарядом на поверхности, его напряженность на открытой местности обычно находится в диапазоне от 100 до 500 В/м. Грозовые облака могут увеличивать напряженность этого поля до десятков-сотен киловольт на метр.

Человеческое тело также излучает электромагнитные поля с частотой выше 300 ГГц и плотностью потока энергии порядка 0,003 Вт/м<sup>2</sup>. Если общая площадь поверхности среднего человеческого тела 1,8 м<sup>2</sup>, то общая излучаемая энергия приблизительно 0,0054 Вт.

## 9.3. Антропогенные источники электромагнитных полей

В соответствии с международной классификацией источники ЭМП делятся на две группы:

1-я группа – источники, генерирующие крайне низкие и сверхнизкие частоты от 0 Гц до 3 кГц;

2-я группа – источники, генерирующие излучение в радиочастотном диапазоне от 3 кГц до 300 ГГц, включая микроволны (СВЧ-излучение) в диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц.

К первой группе относятся в первую очередь все системы производства, передачи и распределения электроэнергии (линии электропередач – трансформаторные подстанции, электростанции, системы электропроводки, различные кабельные системы); домашняя и офисная электро- и электронная техника и т. д.; транспорт на электроприводе: ж/д транспорт и его инфраструктура, городской – метро, троллейбусный, трамвайный.

Вторая группа источников отличается гораздо большим разнообразием как по назначению, так и режимам излучения.

Основную массу составляют так называемые функциональные передатчики – это источники ЭМП в целях передачи или получения информации, излучающие ее контролируемым образом в окружающую среду. Кроме них во вторую группу входят различного технологического оборудования, использующее СВЧ-излучение, переменные (50 Гц – 1 МГц) и импульсные магнитные поля; медицинские терапевтические и диагностические установки (20 МГц – 3 ГГц); бытовое оборудование (СВЧ-печи); средства визуального отображения информации на электронно-лучевых трубках (мониторы ПК, телевизоры и т. п.).

### ***9.3.1. Источники электромагнитных полей промышленной частоты в жилых помещениях***

Источники ЭМП в помещениях разнообразны: электропроводка квартиры, бытовая электротехника – холодильники, утюги, пылесосы, электропечи, телевизоры, компьютеры и др. Кроме того, на электромагнитную обстановку в квартире оказывают влияние электротехническое оборудование здания, в том числе трансформаторы, установленные в смежных помещениях, кабельные линии, подводящие электричество ко всем квартирам и другим потребителям системы жизнеобеспечения здания.

Электрическое поле в жилых домах находится, как правило, в очень умеренных пределах 1 – 10 В/м. Типичный пример распределения переменного электрического поля приведен на рис. 75. Встречаются отдельные точки повышенного уровня, например, у незаземленного монитора ПК, оснащенного системой защитного экранирования, поле может достигать 150 – 170 В/м.

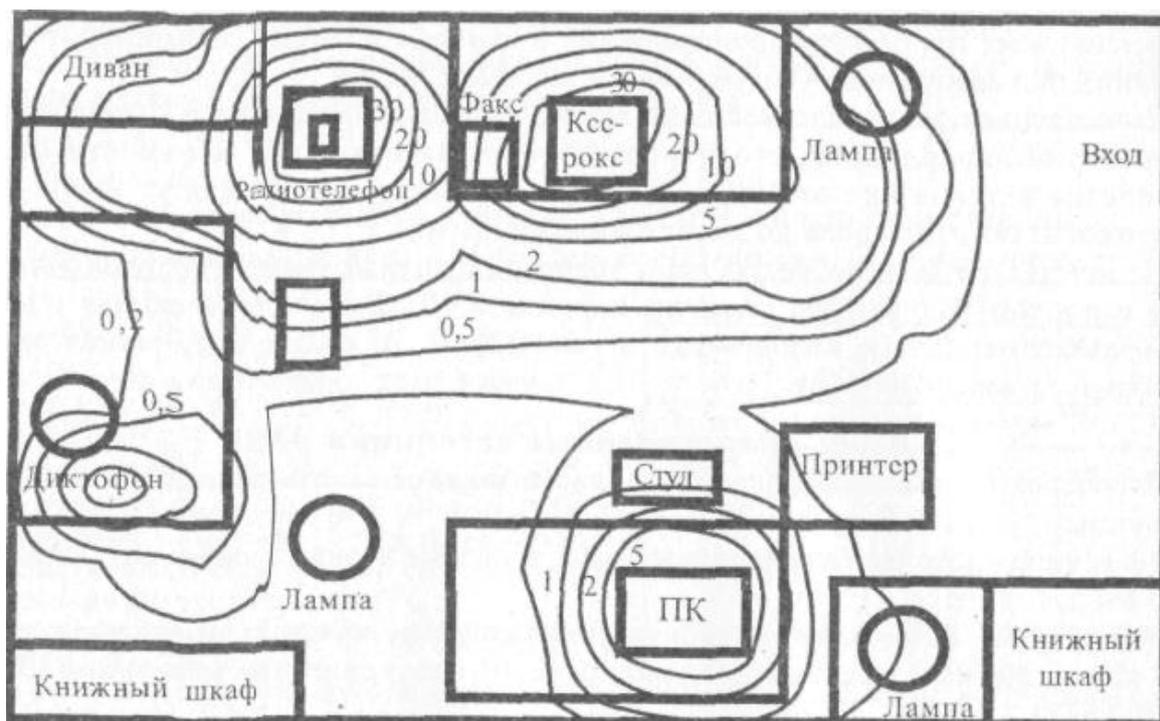


Рис. 75. Пример карты распределения напряженности переменного электрического поля, В/м, частотой 59 Гц в помещении (Центр электромагнитной безопасности)

Характерные параметры ЭМП источников диапазона 0 Гц – 3 кГц представлены в табл. 156.

Таблица 156. Характерные параметры ЭМП источников диапазона 0 Гц – 3 кГц

Источник	Напряженность электрического поля, В/м	Напряженность магнитного поля, А/м
ЛЭП 6-35 кВ	$10 - 5 \cdot 10^2$	0,1 – 2
ЛЭП 110 кВ	$10 - 3 \cdot 10^3$	0,1 – 20
ЛЭП 330 кВ	$10 - 5 \cdot 10^3$	10 – 100
Открытое распределительное устройство (ОРУ) подстанции 500 кВ	$10 - 5 \cdot 10^4$	10 – 100
Кабель электропитания подъезда жилого дома	До $3 \cdot 10^2$	До 20 мкТл

**Линии электропередачи (ЛЭП).** Несмотря на то что электромагнитная энергия поля промышленной частоты 50 Гц в значительной

мере поглощается почвой, напряженность поля под проводами ЛЭП и вблизи их может быть значительной. Напряженность полей под линией зависит от класса напряжения ЛЭП (электрическое поле), нагрузки (магнитное поле), от высоты подвески, расстояния между проводами, растительного покрова рельефа под линией.

На рис. 76 показаны типичные графики распределения переменного электрического поля ЛЭП.

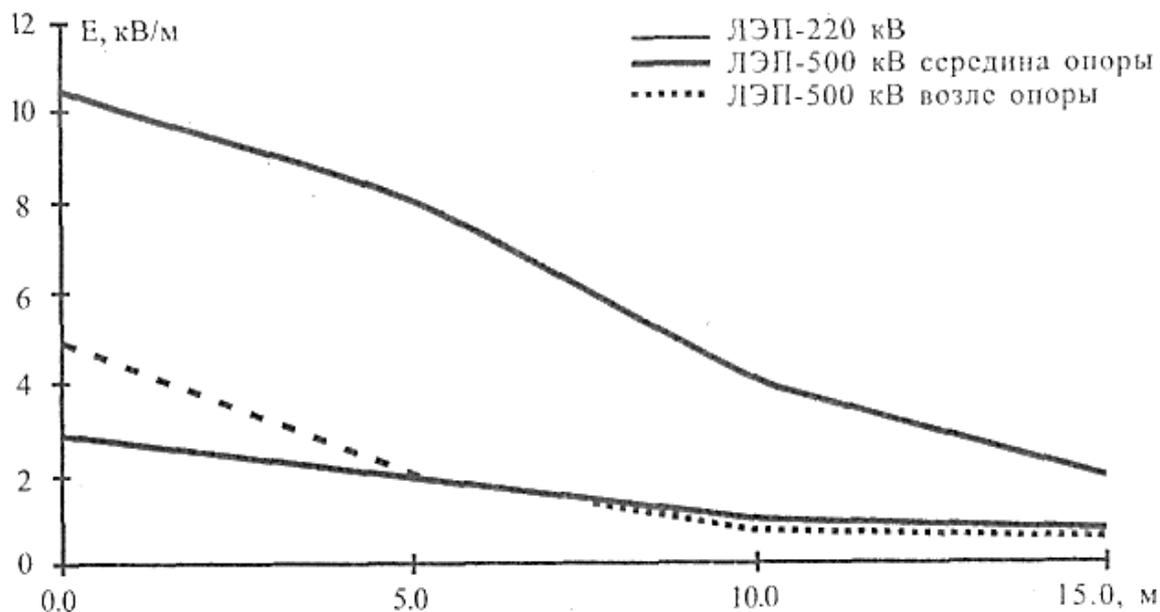


Рис. 76. Типичные графики распределения переменного электрического поля ЛЭП, высота 1,8 м от земли, ПДУ для населения 0,5 кВ/м

Электротранспорт на электроприводе является мощным источником магнитного поля в диапазоне от 0 до 1000 Гц. Работы в этой области только начинаются.

Максимальные значения магнитной индукции в пригородном электротранспорте достигают 75 мкТл; средние значения около 20 мкТл.

Средние значения на транспорте с приводом от постоянного тока зафиксированы на уровне 29 мкТл.

### **9.3.2. Источники электромагнитных полей диапазона 3 кГц – 300 ГГц**

Характерные параметры источников ЭМП этой группы приведены в табл. 157.

Таблица 157. Характерные параметры источников ЭМП диапазона  
3 кГц – 300 ГГц

Источник излучения	Частота излучения	Расстояние до точки излучения	Величина ЭМП	Мощность источника	
Радиостанции НЧ	130 – 285 кГц	300 м	90 В/м	1,8 МВт	
Радиостанции СВ	415 – 1606,5 кГц	50 м	450 В/м	1,8 МВт	
Радиостанции КВ	3,95 – 26,1 МГц	50 м	121 В/м (40 Вт/м <sup>2</sup> )	–	
		220 м	27,5 В/м (2 Вт/м <sup>2</sup> )	750 кВт	
Ручные радиостанции типа «Уоки-токи»	27 МГц	5 см	< 1000 В/м	Несколько ватт	
		12 см	< 0,2 В/м		
			< 200 В/м		
			< 0,1 А/м		
Мобильные телефоны (сотовая связь)	20 МГц – 2 ГГц	10 см	300 В/м	Несколько ватт	
	47 – 68 МГц				
Телевизионные передатчики	174 – 230 МГц	1,5 км	5 – 20 мВт/м <sup>2</sup>		Несколько ватт
	470 – 890 МГц				
Радиостанции FM	87,5 – 108 МГц	1,5 км в зоне действия	50 мВт/м <sup>2</sup>	100 кВт	
Системы охраны	0,9 – 10 ГГц		< 2 мВт/м <sup>2</sup>		
Радиолокаторы стационарные	2,45 ГГц	0,1 – 1,0 км	< 250 мВт/м <sup>2</sup>	0,5 – 100 МВт	
Радиолокационные системы		3 м, 10 м, 5 см	< 10 мВт/м <sup>2</sup>		
Службы слежения авиатранспорта		1 м	10 – 50 Вт/м <sup>2</sup>		
Установки СВЧ-нагрева			< 0,25 мВт/м <sup>2</sup>		

**Функциональные передатчики.** Передающие радиочастоты (ПРЦ) размещаются в специально отведенных для них зонах и могут занимать довольно большие территории (до 1000 га). По своей структуре они включают в себя одно или несколько технических зданий, где находятся радиопередатчики и антенные поля, на которых располагаются до нескольких десятков антенно-фидерных систем (АФС).

Зону возможного неблагоприятного действия ЭМП, создаваемых ПРЦ, можно условно разделить на две части.

Первая – это собственно территория ПРЦ, где размещены все службы, обеспечивающие работу радиопередатчиков и АФС. Эта территория охраняется, и на нее допускаются только лица, профессионально связанные с обслуживанием передатчиков, коммутаторов и АФС. Вторая часть зоны – это прилегающие к ПРЦ территории, доступ на которые не ограничен, где могут размещаться различные жилые постройки. В этом случае возникает угроза облучения населения, находящегося в этой части зоны.

**Телевизионные передатчики.** Телевизионные передатчики располагаются, как правило, в городах. Передающие антенны размещаются обычно на высоте от 110 м.

Типичные значения напряженности электрического поля могут достигать 15 В/м на расстоянии 1 км от передатчика мощностью 1 МВт.

**Системы сотовой связи.** Они состоят из сети базовых станций и ручных персональных радиотелефонов. Базовые станции расположены на расстоянии от 1 до 15 км друг от друга, образуя между собой посредством радиорелейной связи так называемые «соты». Базовые станции обеспечивают связь с персональными ручными радиотелефонами на частотах 450, 800, 900, 1800 МГц. Частота и вид модуляции зависят от типа систем сотовой связи. Основные системы в России: SMT-450, AMPS-DAMPS, GSM.

Мощность передатчиков базовых станций находится в диапазоне от 2,5 до 320 Вт. Наиболее часто используются передатчики мощностью 40 Вт.

Антенны базовых станций устанавливаются на высоте 15 – 50 м от поверхности земли, чаще всего на крышах зданий.

Типичные уровни излучения базовых станций приведены в табл. 158.

Индивидуальные мобильные средства связи делятся на ручные телефоны и телефоны, установленные на автомобилях. Антенны автомобильных средств мобильной связи устанавливаются на разных плоскостях автомобилей. С учетом повышенной мощности передатчиков уровни ЭМП могут быть повышенными. В связи с этим необходим тщательный выбор места установки антенны.

Ручные телефоны сотовой связи имеют мощность от 0,2 до 7 Вт. Выходная мощность коррелируется с системой, а точнее, с частотой, на которой она работает. Чем выше частота, тем меньше выходная мощность.

Таблица 158. Максимальные значения напряженности поля базовых станций

Система	Выходная мощность, Вт	Число каналов	Напряженность электрического поля $E$ , В/м	Напряженность магнитного поля $H$ , А/м
<i>NACS</i> (Великобритания)	20 Вт	40	53	0,14
<i>GSM</i>	40 Вт	10	38	0,10
<i>DCS 1800</i>	20 Вт	10	27	0,07

В табл. 159 представлены максимальные уровни напряженности ЭМП мобильных средств связи автомобильной установки.

Таблица 159. Максимальные уровни напряженности ЭМП мобильных средств связи автомобильной установки

Система	Выходная мощность, Вт	Расстояние, м	Напряженность электрического поля $E$ , В/м	Напряженность магнитного поля $H$ , А/м
<i>NACS</i> (Великобритания)	10	0,1	291	0,77
	0,6	48,5	0,13	–
<i>GSM</i>	2,5	0,1	145	0,39
	0,6	24	0,06	–
<i>DCS</i> 1800	0,125	0,1	32,5	0,09
	0,6	5,4	0,02	–

Оценка уровня ЭМП в зоне воздействия на человека достаточно сложная задача. Антенна сотового телефона располагается на расстоянии 2 – 5 см от головы человека. Существует ряд расчетных методов оценки влияния, в том числе поглощенной дозы, а также напряженности поля в голове человека.

**Система мобильной развязки.** Системы мобильной радиосвязи на несущей частоте 27 МГц имеют большое распространение. Они представляют собой станцию и абонентские станции, установленные в автомобилях или предназначенные для ручного использования. Напряженность электрического поля ручных радиостанций 27 МГц может составлять до 200 В/м на расстоянии 3 см от антенны. Значение напряженности электрического поля базовой станции этой системы радиосвязи могут достигать 900 В/м на расстоянии 5 см от антенны. С учетом требований безопасности подобные системы связи, как правило, требуют использования средств защиты от электромагнитных излучений.

**Системы связи.** Системы спутниковой связи состоят из приемопередающей станции, находящейся на Земле, и спутника, находящегося, как правило, на геостационарной орбите.

Диаграмма направленности антенны станции спутниковой связи имеет ярко выраженный узконаправленный основной луч – главный лепесток.

Значения плотности потока энергии в главном лепестке диаграммы направленности могут достигать значений нескольких сотен ватт на квадратный метр вблизи антенны, создавая также значительные уровни поля на большом удалении.

Системы радиорелейной связи также используют узконаправленные диаграммы излучения. Применяются как в системах телекоммуникаций, так и в системах связи, имеют относительно невысокую мощность, до нескольких десятков ватт. Частоты, используемые в этом виде связи, равны 5 – 40 ГГц. Величины плотности потока энергии могут достигать единиц ватт на квадратный метр в районе размещения антенны.

**Радиолокационные станции.** Радиолокационные станции оснащены, как правило, антеннами зеркального типа. Они имеют узконаправленную диаграмму излучения в виде луча, направленного вдоль оптической оси.

Радиолокационные системы работают на частотах от 500 МГц до 15 ГГц, однако отдельные системы могут работать на частотах до 100 ГГц. Создаваемый ими ЭМ сигнал принципиально отличается от

излучения иных источников. Связано это с тем, что периодическое перемещение антенны в пространстве приводит к пространственной прерывистости облучения. Временная прерывистость облучения обусловлена цикличностью работы радиолокатора на излучение. Время наработки в различных режимах работы радиотехнических средств может исчисляться от нескольких часов до суток. Так, у метеорологических радиолокаторов с временной прерывистостью 30 мин – излучение, 30 мин – пауза, суммарная наработка не превышает 12 ч, в то время как радиолокационные станции аэропортов в большинстве случаев работают круглосуточно. Ширина диаграммы направленности горизонтальной плоскости обычно составляет несколько единиц градусов, а время облучения за период обзора составляет десятки миллисекунд.

Метеорологические радары могут создавать на удалении 1 км ППЭ, равное величинам порядка  $100 \text{ Вт/м}^2$  каждый цикл облучения. Радиолокационные станции аэропортов создают ППЭ, равное примерно  $0,5 \text{ Вт/м}^2$  на расстоянии 60 м. Морское радиолокационное оборудование устанавливают на всех кораблях. Обычно оно имеет мощность передатчика на порядок меньшую, чем у аэродромных радаров, поэтому в обычном режиме сканирования ППЭ, создаваемое на расстоянии нескольких метров, не превышает  $10 \text{ Вт/м}^2$ .

**Технологическое оборудование.** Технологическое оборудование отличается значительным разнообразием рабочих частот и режимов работы. Типичные данные об условиях облучения на рабочих местах некоторых специальностей приведены в табл. 160.

**Видеодисплейные терминалы и персональные компьютеры.** Средства отображения информации, использующие электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), являются источником электромагнитного излучения в широкой полосе частот. Наибольшее распространение имеют видеодисплейные терминалы и персональные компьютеры с мониторами на ЭЛТ.

Типичные карты электромагнитной обстановки на рабочем месте пользователя приведены на рис. 77 – 78. Очевидно, что электромагнитная обстановка в помещениях с компьютерами крайне сложная, распределение полей неравномерное, а уровни достаточно высоки.

**Микроволновые печи.** Рабочая частота СВЧ-излучения микроволновых печей составляет 2,45 ГГц. По многочисленным данным, ППЭ бытовых СВЧ-печей не превышает 10 Вт/м<sup>2</sup> на расстоянии 0,05 м и только в экстремальных случаях превышает 50 Вт/м<sup>2</sup>.

*Таблица 160.* Интенсивность ЭМИ на рабочих местах ряда специальностей

Производственный процесс	Основные источники излучения	Интенсивность облучения персонала, мкВт/см <sup>2</sup>
Регулировка, настройка и испытание комплекса РЛС в выпускных цехах заводов и ремонтных мастерских	Антенные системы	1000 и более
Регулировка, настройка и испытание комплекса РЛС в условиях полигона	Антенные системы	500 и более
Регулировка, настройка и испытание отдельных СВЧ-узлов, блоков и приборов	Катодные выводы магнетрона, волноводокоаксиальные переходы и др.	До 1000
Научно-исследовательские работы	Антенные устройства, генераторные блоки, СВЧ-приборы и др.	До 1000
	Антенные системы	100 – 1000
Эксплуатация РЛС на аэродромах гражданской авиации	Разные антенные системы, генераторные блоки, излучатели и др.	1 – 2000
Эксплуатация СВЧ-аппаратов в некоторых областях народного хозяйства, в том числе физиотерапевтические кабинеты		
Контрольно-измерительные работы в экранированных помещениях	Генераторные блоки, разные антенные системы	5 – 50 (сложные ЭМП)

Более 50 % мониторов не соответствуют требованиям международных стандартов по электромагнитной безопасности, что предполагает необходимость использования средств защиты.

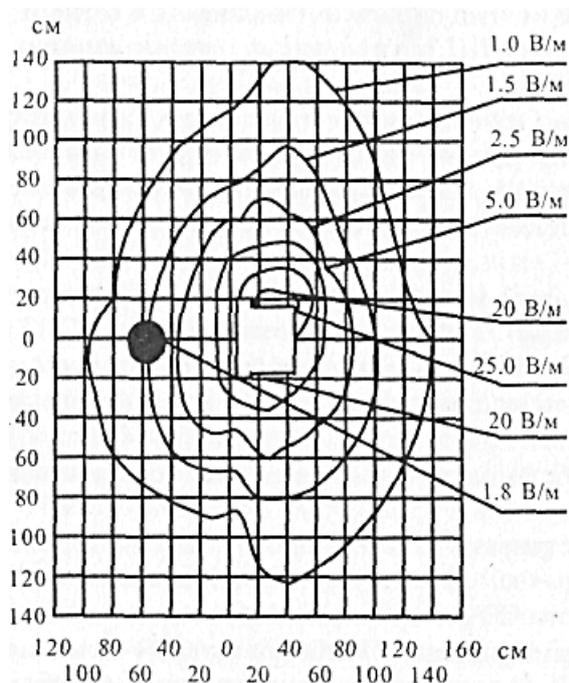


Рис. 77. Типичная карта распределения напряженности переменного электрического поля частотой 2 – 400 кГц вокруг монитора персонального компьютера (Центр электромагнитной безопасности)

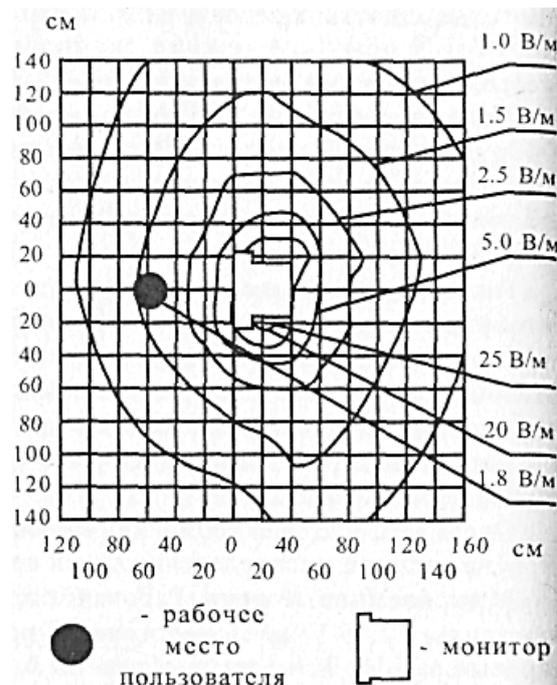


Рис. 78. Пример карты электромагнитного поля на рабочем месте пользователя. Среднеквадратичное значение модуля напряженности переменного электрического поля в диапазоне 100 кГц – 300 МГц. Монитор *Technotex* (Центр электромагнитной безопасности)

#### 9.4. Способы защиты от электромагнитных полей

Для защиты персонала применяются следующие инженерно-технические средства:

- уменьшение интенсивности излучения непосредственно от самого источника излучения;
- экранирование источника излучения;
- экранирование рабочего места у источника излучений;
- удаление рабочего места от источника излучения (дистанционное управление);
- использование предупреждающей сигнализации (световая, звуковая и т. д.);
- рациональное размещение в рабочем помещении оборудования, излучающего ЭМП;
- установление рациональных режимов работы оборудования;

- ограничение времени пребывания обслуживающего персонала в зоне действия ЭМП;
- применение индивидуальных средств защиты;
- экранирование помещения с источником ЭМ;
- экранирование помещения, где находятся люди.

#### 9.4.1. Экранирование. Расчет экранов

Наиболее эффективным способом снижения интенсивности ЭМП является экранирование. Эффективность экранирования показывает, во сколько раз уменьшается напряженность поля на данном участке при экранировании источника

$$\mathcal{E} = E_0/E_{\mathcal{E}}, \quad (410)$$

где  $\mathcal{E}$  – эффективность экранирования;

$E_0$  – напряженность поля до экранирования, В/м;

$E_{\mathcal{E}}$  – напряженность поля после экранирования, В/м.

Эффективность экранирования в первую очередь определяется экранирующими свойствами материала, видом экрана, методом его установки.

Значение эффективности экранирования полей высоких частот металлическими листами и сетками приведены в табл. 161.

В зависимости от производственного процесса, мощности излучения, диапазонов волн можно рекомендовать разные виды экранов:

- 1) металлические сплошные и сетчатые;
- 2) мягкие и металлические с хлопчатобумажной и другой ниткой;
- 3) поглощающие экраны.

Таблица 161. Значения эффективности экранирования полей высоких частот металлическими листами и сетками

Вид экрана	Материал экрана	Частота, кГц				
		10	100	1000	10 000	10 000
Металлические листы толщиной 0,5 мм	Сталь	$2,5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$
	Медь	$5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$
	Алюминий	$3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$
Проволока диаметром 0,1 мм	Медь	$3,5 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^3$

Вид экрана	Материал экрана	Частота, кГц				
		10	100	1000	10000	100000
Металлические сетки	Медь, проволока диаметром 1 мм, ячейки 10 × 10 мм	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^2$
	Сталь, проволока диаметром 0,1 мм, ячейки 1 × 1 мм	$6 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^2$
	Сталь, проволока диаметром 1 мм, ячейки 10 × 10 мм	$5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^2$

#### 9.4.2. Поглощающие экраны

Принцип действия всех экранов, кроме поглощающих, основан на отражении энергии ЭМП.

Защитное действие поглощающего экрана обуславливается наведением в экране токов Фуко, которые, в свою очередь, наводят в экране вторичное поле, по амплитуде почти равное, а по фазе – противоположное экранируемому полю. В результате их сложения суммарное поле быстро убывает, проникая в экран на незначительную глубину.

Экран должен быть электрически герметичен, а контактирующие поверхности его частей должны иметь антикоррозийное покрытие и плотно прижиматься друг к другу по всему периметру. Для соединения двух сеток используются резиновые прокладки, обернутые в 2 – 3 слоя медной фольгой и латунной луженой сеткой.

Характеристики поглощающих экранов, рекомендуемых для покрытия экранизирующих ограждений, приведены в табл. 162.

Экраны могут быть использованы для экранирования помещения, источника излучения, рабочего места.

Все экраны должны быть тщательно заземлены, так же как и при защите от статического электричества:  $r_{\text{заз}}$  должны быть порядка 100 Ом.

**Таблица 162. Специальные материалы для изготовления средств защиты от облучения ЭМП**

Наименование материала	Тип, марка	Ед. измерения	Масса 1 м <sup>2</sup> материала, кг	Размеры, мм	Рабочий диапазон волн, см	Коэффициент отражения мощности, %	Ослабление проходящей мощности, %
Экранирующие материалы стеклорадиозащиты с окислометаллической пленкой	ВТУ	–	–	От 300 – 500	0,8 – 150	–	99
	РЗ-ГИС 1-65	–	–	До 2000	0,8 – 150	–	99
Ткань хлопчатобумажная с микропроволокой	арт. 7289	Погон. м	–	Толщина 4, 5, 6	0,8 – 100	–	–
	СТУ-36.12-199-63	Погон. м	–	Толщина 4, 5, 6	0,8 – 100	–	–
Радиопоглощающие материалы, резиновые коврики	В2Ф2	кг	4 – 5	345 × 345	0,8 – 4	2	2
	В2Ф3	кг		Толщина 11 – 14			2
	ВКФ1	кг	3,5 – 4	Включая шипы	0,8 – 4	2	
Магнитодиэлектрические пластины	ХВ-0,8 – 2,0	кг	3 – 9	345 × 400	0,8 – 2,0	–	–
	3,2 – 4,4						
	6,2 – 8,5						
	10,6						
Поглощающие пластины	СВЧ-0,68	м <sup>2</sup>	18 – 20	100 × 100 × 40	15 – 200	3-4	–
Поглощающий материал	ВТУ 0,1 – 66;	м <sup>2</sup>	19 – 21	1750 × 1000	0,8 – 20	3	–
	ЛУЧ-100;	м <sup>2</sup>	38 – 41,6	1750 × 1000	0,8 – 40	3	–
	ВТУ 0,2 – 68	м <sup>2</sup>	38 – 41,6	1750 × 1000	0,8 – 40	3	–

### **9.4.3. Отражающие экраны**

Сплошные металлические экраны обеспечивают надежное экранирование при любых практически встречающихся интенсивностях СВЧ-полей с учетом допустимых величин (10 мкВт/см). Экран может быть изготовлен из металла любой толщины. При толщине экрана 0,01 мм поле СВЧ ослабляется на 50 дБ.

Сетчатые экраны обладают худшими экранирующими свойствами по сравнению со сплошными. Их эффективность 20 – 30 дБ (табл. 163).

Эластичные экраны могут применяться для изготовления штор, занавесок, драпировок, чехлов, спецодежды. В экранах используется специальная ткань, в структуре которой тонкие металлические нити образуют сетку размерами ячейки 0,5 × 0,5 мм. Специальное стекло, покрытое полупроводниковой двуокисью олова, ослабляет энергию СВЧ на 20 дБ.

*Таблица 163. Основные размеры образцовых сетчатых экранов, используемых для защиты от ЭМП*

Номер сетки	Размер стороны ячейки в свету, мм	Число ячеек на 1 см <sup>2</sup> сетки	Диаметр проволоки, мм	Масса 1 м <sup>2</sup> сетки, кг
2,6	2,6	10,4	0,50	1,14
2	2	16	0,50	1,41
1,25	1,25	34,6	0,40	1,33
1	1	54,9	0,35	1,28
0,9	0,9	64	0,35	1,38
0,8	0,8	68,6	0,30	1,20
0,5	0,5	193	0,22	0,94
0,4	0,4	381	0,15	0,58
0,2	0,2	918	0,13	0,72
0,1	0,1	3460	0,07	0,40

В табл. 164 приведены некоторые виды экранирующих материалов для изготовления средств защиты от ЭМИ РЧ в диапазоне частот от 30 МГц до 40 ГГц.

*Таблица 164. Экранирующие материалы для изготовления средств защиты от ЭМИ РЧ в диапазоне частот 30 МГц – 40 ГГц*

Наименование материала	ГОСТ, ТУ	Толщина, мм	Диапазон частот, Гц	Ослабление, дБ
Листовая СтЗ	по [39]	1,4	30 МГц – 40 ГГц	100
Фольга алюминиевая	по [40]	0,08		80
Фольга медная	по [41]	0,08	30 МГц – 40 ГГц	80
Сетка стальная тканая	по [42]	0,3-1,3	30 МГц – 40 ГГц	30

Наименование материала	ГОСТ, ТУ	Толщина, мм	Диапазон частот, Гц	Ослабление, дБ
Радиозащитное стекло с одно- или двухсторонним полупроводниковым покрытием	по [43]	6	30 МГц – 30 ГГц	20 – 40
Ткань хлопчатобумажная с микропроводом	по [44]	–	30 МГц – 30 ГГц	20 – 40
Ткань металлизированная «Восход»	–	–	10 кГц – 30 ГГц	40 – 65
Ткань трикотажная (полиамид + проволока)	по [45]	–	30 кГц – 30 МГц	15 – 40

В табл. 165 приведены основные характеристики приборов, рекомендуемых для измерения интенсивности ЭМИ РЧ.

#### Порядок определения способов защиты человека от ЭМП

1. Определите тип источника ЭМП, его характеристику, назначение, частоту излучения.
2. По табл. 149 – 153 определите допустимые нормы ЭМП.
3. Определите способы защиты от ЭМП в зависимости от размещения источника излучения и расположения рабочего места.
4. Определите тип экрана и его возможную эффективность, используя данные п. 3 и табл. 160 – 163.
5. Рассчитайте устройство защитного заземления экрана [34 – 45].
6. Дайте схему экрана, его размещение.
7. Сделайте выводы.

Таблица 165. Основные характеристики приборов, рекомендуемых для измерения интенсивности ЭМИ РЧ

Тип	Основная характеристика	Рабочий диапазон частот	Пределы измерения	Погрешность
ПЗ-21	Измеритель напряженности поля с изотропными датчиками	$E$ : 10к Гц – 300 МГц	$E$ : 1 – 1000 В/м	Не более 2,5 дБ
ПЗ-16		$H$ : 100 кГц – 30 МГц	$H$ : 0,5 – 16 А/м	
ПЗ-22 ПЗ-15 ПЗ-16 ПЗ-17	Измеритель напряженности поля	$E$ и $H$ : 10 кГц – 300 МГц	$E$ : 1 – 3000 В/м $H$ : 0,3 – 500 А/м	Не более 2,5 дБ

Тип	Основная характеристика	Рабочий диапазон частот	Пределы измерения	Погрешность
ПЗ-23	Измеритель плотности потока энергии	37,5 – 118 ГГц	0,5 – 2000 мкВт/см <sup>2</sup>	Не более 2,5 дБ
ПЗ-22/1	Измеритель напряженности поля	<i>E</i> : 0,01 – 300 МГц	<i>E</i> : 1 – 1000 В/м	То же
		<i>H</i> : 0,01 – 50 МГц	<i>H</i> : 0,3 – 60 А/м	
ПЗ-22/2	То же	<i>E</i> : 0,01 – 300 МГц	<i>E</i> : 30 – 3000 В/м	>>
		<i>H</i> : 0,01 – 30 МГц	<i>H</i> : 2 – 500 А/м	
ПЗ-22/3	>>	<i>E</i> : 0,01 – 1000 МГц	<i>E</i> : 1 – 100 В/м	>>
		<i>H</i> : 0,01 – 300 МГц	<i>H</i> : 0,1 – 40 А/м	
ПЗ-22/4	>>	<i>E</i> : 0,01 – 300 МГц	<i>E</i> : 1 – 3000 В/м	>>
		<i>H</i> : 0,01 – 300 МГц	<i>H</i> : 0,1 – 500 А/м	
ПЗ-18 ПЗ-19	Измерители плотности потока энергии	0,3 – 39,65 ГГц	0,32 мкВт/см <sup>2</sup>	–
ПЗ-20		–	–100 мВт/см <sup>2</sup>	

### 9.5. Воздействие на человека и нормирование электромагнитных полей

Предельно допустимый уровень напряженности ЭП  $E_{\text{пред}}$  равен 60 кВ/м в течение одного часа. При напряженности менее 20 кВ/м время пребывания в ЭП не регламентируется. В диапазоне напряженности 20 – 60 кВ/м допустимое время пребывания персонала в ЭП без средств защиты, ч,

$$t_{\text{доп}} = E_{\text{пред}}^2 / E_{\text{факт}}^2, \quad (411)$$

где  $E_{\text{факт}}$  – фактическое значение напряженности ЭП, кВ/м.

Пребывание в электрическом поле напряженностью до 5 кВ/м включительно допускается в течение всего рабочего дня. Допустимое время пребывания в ЭП напряженностью 5 – 20 кВ/м, ч,

$$T = 50 / E - 2, \quad (412)$$

где  $E$  – напряженность воздействующего ЭП в контролируемой зоне, кВ/м.

При нахождении персонала в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью электрического поля время пребывания

$$T_{\text{пр}} = 8(t_{E_1} / T_{E_1} + t_{E_2} / T_{E_2} + \dots + t_{E_n} / T_{E_n}), \quad (413)$$

где  $T_{\text{пр}}$  – приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту пребыванию в ЭП нижней границы нормируемой напряженности, ч ( $T_{\text{пр}} \leq 8$  ч);

$t_{E_1}, t_{E_2} \dots t_{E_n}$  – время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью  $E_1, E_2 \dots E_n$ ;

$T_{E_1}, T_{E_2} \dots T_{E_n}$  – допустимое время пребывания в электрическом поле для соответствующих контролируемых зон. Различия в уровнях напряженности электрического поля контролируемых зон устанавливается 1 кВ/м.

## 9.6. Нормирование воздействия электромагнитного излучения радиочастот

Энергетическая экспозиция, создаваемая электрическим полем, равна,  $(\text{В/м})^2 \cdot \text{ч}$ ,

$$\text{ЭЭ}_E = E^2 T, \quad (414)$$

Энергетическая экспозиция, создаваемая магнитным полем,  $(\text{А/м})^2 \cdot \text{ч}$ ,

$$\text{ЭЭ}_H = H^2 T. \quad (415)$$

Энергетическая экспозиция за рабочий день (рабочую смену) не должна превышать значений, указанных в табл. 166.

Таблица 166. Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

Диапазоны частот	Предельно допустимая энергетическая экспозиция		
	По электрической составляющей, $(\text{В/м})^2 \cdot \text{ч}$	По магнитной составляющей, $(\text{А/м})^2 \cdot \text{ч}$	По плотности потока энергии, $(\text{мкВт/см}^2) \cdot \text{ч}$
30 кГц – 3 МГц	20000,0	200,0	–
3 – 30 МГц	7000,0	Не разработаны	–
30 – 50 МГц	800,0	0,72	–
50 – 300 МГц	800,0	Не разработаны	–
300 МГц – 300 ГГц	–	–	200,0

*Примечание.* В настоящих санитарных нормах и правилах во всех случаях при указании диапазонов частот каждый диапазон исключает нижний и включает верхний пределы частоты.

Предельно допустимые значения интенсивности ЭМИ РЧ ( $E_{\text{пду}}$ ,  $H_{\text{пду}}$ ,  $\text{ППЭ}_{\text{пду}}$ ) в зависимости от времени воздействия в течение рабочего дня (рабочей смены) и допустимое время воздействия в зависимости от интенсивности ЭМИ РЧ определяются по формулам

$$E_{\text{пду}} = (\text{ЭЭ}_{\text{ЕПД}}/T)^{1/2}; \quad (416)$$

$$H_{\text{пду}} = (\text{ЭЭ}_{\text{НПД}}/T)^{1/2}; \quad (417)$$

$$\text{ППЭ}_{\text{пду}} = \text{ЭЭ}_{\text{ППЭПД}}/T; \quad (418)$$

$$T_{\text{пд}} = \text{ЭЭ}_{\text{ЕПД}}/E^2; \quad (419)$$

$$T_{\text{пд}} = \text{ЭЭ}_{\text{НПД}}/H^2; \quad (420)$$

$$T_{\text{пд}} = \text{ЭЭ}_{\text{ППЭПД}}/\text{ППЭ}. \quad (421)$$

Предельно допустимая интенсивность воздействия от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20, рассчитывается по формуле

$$\text{ППЭ}_{\text{пду}} = K \cdot \text{ЭЭ}_{\text{ППЭПД}}/T, \quad (422)$$

где  $K$  – коэффициент ослабления биологической активности прерывистых воздействий, равный 10.

Независимо от продолжительности воздействия интенсивность не должна превышать максимальных значений (например, 1000 мкВт/см<sup>2</sup> для диапазона частот 300 МГц – 300 ГГц).

Для случая локального облучения кистей рук при работе с микрореполосковыми СВЧ-устройствами предельно допустимые уровни воздействия вычисляются по выражению

$$\text{ППЭ}_{\text{пду}} = K_1 \cdot \text{ЭЭ}_{\text{ППЭПД}}/T, \quad (423)$$

где  $K_1$  – коэффициент ослабления биологической активности, равный 12,5. При этом плотность потока энергии на кистях рук не должна превышать 5000 мкВт/см<sup>2</sup>.

## 9.7. Защита от статических полей и излучений промышленной частоты

Мощным источником электромагнитного поля являются воздушные линии электропередач. Напряженность электрического поля у поверхности земли под проводами ЛЭП достигает значительной величины: для ЛЭП 330 кВ – от 3,5 до 5 кВ/м, для ЛЭП 600 кВ – 7,5 – 8 кВ/м, для ЛЭП 750 кВ – до 15 кВ/м.

Для вновь проектируемых линий ширину санитарно-защитной зоны можно определить с помощью табл. 167, где приведены расстояния от границы зоны до проекции крайнего фазного провода.

Таблица 167. Расстояние от границы санитарно-защитной зоны до проекции крайнего фазного провода

Напряжение ЛЭП, кВ	330	500	750	1150
Расстояние, м	20	30	40	55

### 9.8. Средства защиты от электромагнитных излучений радиочастот

Значения предельно допустимых уровней напряженности электрической  $E_{ПДУ}$  и магнитной  $H_{ПДУ}$  составляющих в диапазоне частот 30 кГц – 300 МГц в зависимости от продолжительности воздействия приведены в табл. 168. В табл. 169 представлены предельно допустимые уровни плотности энергии (ППЭПДУ) в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия.

Таблица 168. Значения предельно допустимых уровней напряженности от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия $t$ , ч	$E_{ПДУ}$ , В/м			$H_{ПДУ}$ , А/м	
	0,03 – 3 МГц	3 – 30 МГц	30 – 300 МГц	0,03 – 3 МГц	30 – 50 МГц
8,0 и более	50	30	10	5,0	0,30
7,5	52	31	10	5,0	0,31
7,0	53	32	11	5,3	0,32
6,5	55	33	11	5,5	0,33
6,0	58	34	12	5,8	0,34
5,5	60	36	12	6,0	0,36
5,0	63	37	13	6,3	0,38
4,5	67	39	13	6,7	0,40
4,0	71	42	14	7,1	0,42
3,5	76	45	15	7,6	0,45
3,0	82	48	16	8,2	0,49
2,5	89	52	18	8,9	0,54

Продолжительность воздействия $t$ , ч	$E_{пду}$ , В/м			$H_{пду}$ , А/м	
	0,03 – 3 МГц	3 – 30 МГц	30 – 300 МГц	0,03 – 3 МГц	30 – 50 МГц
2,0	100	59	20	10,0	0,60
1,5	115	68	23	11,5	0,69
1,0	141	84	28	14,2	0,85
0,5	200	118	40	20,0	1,20
0,25	283	168	57	28,3	1,70
0,125	400	263	80	40,0	2,40
0,08 и менее	500	296	80	50,0	3,00

*Примечание.* При продолжительности воздействия менее 0,08 ч дальнейшее повышение интенсивности не допускается.

*Таблица 169.* Предельно допустимые уровни плотности энергии в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия

Продолжительность воздействия $t$ , ч	ППЭПДУ, мкВт/см <sup>2</sup>
8,0 и более	25
7,5	27
7	29
6,5	31
6,0	33
5,5	36
5,0	40
4,5	44
4,0	50
3,5	57
3,0	67
2,5	80
2,0	100
1,5	133
1,0	200
0,5	400
0,25	800
0,2 и менее	1000

*Примечание.* При продолжительности воздействия менее 0,2 ч дальнейшее повышение интенсивности воздействия не допускается.

## 9.9. Экранирование электромагнитных полей. Расчет и конструирование защитных экранов

Электромагнитное поле имеет зоны индукции и излучения, которые для элементарных излучателей (диполей) в воздухе определяются соответственно неравенствами

$$r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (kr \ll 1), \quad (424)$$

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \quad (kr \gg 1), \quad (425)$$

где  $r$  – расстояние до источника;

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{– волновое число}, \quad (426)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота ЭМП;

$f$  – частота ЭМП;

$c$  – скорость распространения ЭМП (для воздуха скорость света 300 000 км/с);

$\lambda = c/f$  – длина волны ЭМП.

Обычно считают, что на расстоянии от источника, не большем длины волны – зона индукции. Например, для частоты  $f = 10^9$  Гц = 1 ГГц расстояние, которое определяет зону индукции, меньше  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м}}{10^9 \text{ Гц}} = 0,3$  м. Для  $f = 106$  Гц – 300 м.

Для антенн зону излучения обозначают неравенством  $r > l^2/\lambda$ , где  $l$  – размер антенны.

В зоне излучения поле практически принимает плоскую конфигурацию и распространяется в виде плоской волны, составляющие которой

$$\tilde{E} = \dot{E}_m e^{j(\omega t - k_* r)}; \quad \tilde{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\dot{\epsilon}_*}} \tilde{E}, \quad (427)$$

где  $\dot{\epsilon}_* = \epsilon - j\sigma/\omega$  – комплексная диэлектрическая проницаемость среды;

$\epsilon$  и  $\mu$  – абсолютные проницаемости соответственно диэлектрическая и магнитная;

$\sigma$  – удельная проводимость среды;

$k_* = \omega \sqrt{\mu \dot{\epsilon}_*}$  – комплексное волновое число;

$\dot{E}_m = E_m e^{j\varphi_E}$  – комплексная амплитуда напряженности поля;

$E_m$  – амплитуда напряженности поля;

$\varphi_E$  – начальная фаза;

$r$  – расстояние от антенны до заданной точки пространства.

Модуль напряженности электрического поля излучающей антенны в зоне излучения может быть вычислен по формуле

$$E = \sqrt{\frac{P_{\text{изл}} G_0 Z_0}{4\pi} \frac{F(\Theta, \varphi)}{r}}, \quad (428)$$

где  $E$  – напряженность поля в заданной точке пространства, В/м;

$P_{\text{изл}}$  – мощность передатчика, Вт;

$G_0$  – коэффициент направленного действия (КНД) антенны (излучателя) в направлении максимального излучения;

$Z_0$  – волновое сопротивление свободного пространства, равное 120 Ом;

$F(\Theta, \varphi)$  – диаграмма направленности антенны;

$r$  – расстояние от антенны до заданной точки пространства, м.

В диапазонах длинных и средних волн ( $200 \text{ м} < \lambda < 2000 \text{ м}$ ) расстояние  $r$  до места возможного расположения людей может удовлетворять условию  $r \ll \lambda/(2\pi)$ , т. е. точка наблюдения находится в зоне индукции (ближней зоне). В этом случае понятие диаграммы направленности теряет смысл.

Для простейшей антенны в виде элементарного вибратора, длина которого значительно меньше длины волны, а распределение тока по длине равномерно, для нахождения напряженности поля можно воспользоваться выражениями

$$E_r = \frac{Il}{2\pi\omega\epsilon_0 r^3} (1 + jkr) \cos\Theta, \quad (429)$$

$$E_\Theta = \frac{Il}{4\pi\omega\epsilon_0 r^3} (1 + jkr - k^2 r^2) \sin\Theta, \quad (430)$$

$$H_\varphi = \frac{Il}{4\pi r^2} (1 + jkr) \sin\Theta, \quad (431)$$

где  $I$  – ток вибратора, А;

$l$  – длина вибратора, м;

$\omega$  – частота поля, рад/с;

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ Ф/м}$  – диэлектрическая постоянная;

$k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;

$\Theta$  – угол между осью вибратора и направлением в точку наблюдения.

В случае, если величина тока в вибраторе неизвестна, можно произведение  $Il$  выразить через излучаемую мощность  $P_{\text{изл}}$

$$Il = \sqrt{\frac{3P_{\text{изл}} r^2 \lambda^2}{2\pi Z_0}}. \quad (432)$$

На частотах выше 300 МГц величина плотности потока для конкретной антенны в зоне излучения (дальней зоне) может вычисляться по формуле

$$\text{ППЭ} = \frac{P_{\text{изл}} G_0 / F(\Theta, \varphi)}{4\pi r^2}. \quad (433)$$

Экранирование при воздействии статического электрического поля осуществляют весьма простым способом. Достаточно поместить экранируемый объект в замкнутую металлическую область любой толщины и соединить ее с точкой нулевого потенциала (с корпусом), при этом следует иметь в виду, что наличие в экране неплотностей (щелей) приводит к проникновению внутрь экрана внешнего электрического поля

$$E = E_0 \left(\frac{2b}{\pi r}\right)^2 \exp\left(-\frac{\pi d}{b} - 2\right), \quad (434)$$

где  $E_0$  – внешнее электрическое поле;

$b$  и  $d$  – ширина щели и толщина материала экрана соответственно;

$r$  – расстояние от центра щели до рассматриваемой точки внутри экрана.

При наличии щели в экране поле внутри экрана

$$H = H_0 \left(\frac{2b}{\pi r}\right)^2 \left[1 + \exp\left(-\frac{\pi d}{b} - 2\right)\right], \quad (435)$$

где  $H$ ,  $H_0$  – внутреннее и внешнее магнитные поля соответственно, остальные обозначения даны выше.

Экран сферической или близкой к ней формы (радиус эквивалентной сферы определяют исходя из равенства объемов) имеет коэффициент экранирования

$$K_{\text{эс}} = 1 + \frac{2(\mu_r - 1)^2}{9\mu_r} \left(1 - \frac{R_1^3}{R_2^3}\right), \quad (436)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала экрана;

$R_1$ ,  $R_2$  – внутренний и внешний радиусы экрана соответственно.

Для цилиндрического экрана, который имитирует экран сложной геометрической формы, одно измерение которого значительно больше двух других, коэффициент экранирования

$$K_{\text{эц}} = 1 + \left( \frac{(\mu_r - 1)^2}{4\mu_r} \right) \left( 1 - \frac{R_1^3}{R_2^3} \right). \quad (437)$$

При  $\mu_r \gg 1$ ,  $R_1 = R_2 - d$  ( $d$  – толщина экрана)

$$K_{\text{эс}} \approx 1 + \frac{2}{3} \mu_r \frac{d}{R_2}, \quad (438)$$

$$K_{\text{эц}} \approx 1 + \frac{\mu_r d}{2R_2}. \quad (439)$$

Соотношение между коэффициентом экранирования  $K_э$  и ослаблением магнитного поля  $\Delta$  определяется формулой  $\Delta = 20 \lg K_э$ .

Электромагнитное экранирование осуществляют с помощью экранов. Толщину экрана из сплошного материала рассчитывают по формуле, м,

$$b = \frac{\Delta_{\text{тр}}}{15,4 \sqrt{f \mu_\alpha \sigma}}, \quad (440)$$

где  $\Delta_{\text{тр}}$  – заданное ослабление интенсивности электромагнитного излучения, равное отношению фактической интенсивности к предельно допустимой, дБ;

$f$  – частота ЭМП, Гц;

$\mu_\alpha$  – абсолютная магнитная проницаемость материала экрана, Гн/м;

$\sigma$  – удельная проводимость материала экрана, Ом/м.

Иногда необходимую толщину материала экрана удобнее определять по формуле, м,

$$b = \frac{\Delta_{\text{тр}}}{16,7 \sqrt{\frac{\mu_r f}{\rho}}}, \quad (441)$$

где  $\Delta_{\text{тр}}$  – величина необходимого ослабления, дБ;

$$\Delta_{\text{тр}} = 10 \lg \frac{J}{J_{\text{норм}}}, \quad (442)$$

где  $J$  – фактическая энергетическая интенсивность;

$J_{\text{норм}}$  – предельно допустимая энергетическая интенсивность;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала экрана;  
 $\rho$  – удельное сопротивление материала экрана, Ом · м;  
 $f$  – частота колебаний ЭМП, МГц.

Если под  $J/J_{\text{норм}}$  понимается отношение двух одноименных силовых величин (значений напряженности поля), то необходимое ослабление находится по формуле, дБ,

$$\Delta_{\text{тр}} = 20 \lg \frac{J}{J_{\text{норм}}}. \quad (443)$$

Эффективность экрана из одного слоя сетки из цветного металла, расположенного в зоне индукции (ближней зоне), вычисляется по выражению

$$\Delta[\text{дБ}] = 20 \lg \left( \frac{1}{\eta} \right), \quad (444)$$

где  $\eta$  – проницаемость экрана:

$$\eta = \frac{3\gamma}{1 + 3\gamma}, \quad (445)$$

где  $\gamma$  – параметр экранирования:

$$\gamma = \frac{d}{2\pi R} \left( \ln \frac{d}{r_0} - 1,25 \right), \quad (446)$$

где  $d$  – шаг сетки (ячейки);

$r_0$  – радиус проволоки сетки;

$R$  – радиус эквивалентного экрана

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}, \quad (447)$$

где  $V$  – объем экранирующей камеры.

Ослабление энергетической интенсивности электромагнитного излучения сетчатыми экранами в дальней зоне при нормальном падении волны и векторе  $E$ , параллельной проволокам сетки одного из направлений, находят по формуле, дБ,

$$\Delta = 10 \lg \frac{1 + 4 \left( \frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2}{4 \left( \frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2}. \quad (448)$$

При оценке эффективности экранирующих устройств должно соблюдаться следующее условие:

$$\Delta_{\text{тр}} \leq \Delta. \quad (449)$$

В табл. 170 приведены характеристики некоторых радиопоглощающих материалов. В последние годы все большее распространение получают керамико-металлические композиции. Эффективность экранирования сотовыми решетками вплоть до сантиметрового диапазона зависит от соотношения глубины и ширины ячейки.

Ориентировочно эффективность  $\Delta \approx 27l/l_m + 20 \lg n$ , где  $l$  и  $l_m$  – глубина и максимальный поперечный размер ячейки сотовой решетки;  $n$  – число ячеек.

*Таблица 170.* Основные характеристики радиопоглощающих материалов

Марка поглотителя и материал, лежащий в его основе	Диапазон рабочих волн, см	Отраженная мощность, %	Толщина материала
СВЧ-068, феррит	15 – 200	3	4
«Луч», древесное волокно	15 – 150	1 – 3	–
В2Ф2, резина	0,8 – 4	2	11 – 14
В2Ф3, ВКФ1, резина	0,8 – 4	4	11 – 14
«Болото», поролон	0,8 – 100	1 – 2	–

### 9.10. Задание для самостоятельных расчетов

Индивидуальные варианты для выполнения расчета берутся из табл. 171.

*Задание.* В лабораторном помещении работает передатчик мощностью  $P_{\text{изл}}$ , Вт, длина волны электромагнитного излучения  $\lambda$  см, коэффициент направленного действия антенны  $G_0$ . В процессе работы с передатчиком главный максимум может быть длительно направлен на отдельные рабочие места, расположенные на расстоянии 2 м и более. Длительность облучения составляет полный рабочий день (8 ч). Оценить возможность защиты расстоянием.

Определить минимальную толщину алюминиевого листа экрана, при которой проникающее через кожух излучение по интенсивности не превышает допустимое. Подобрать соответствующий поглощающий материал для облицовки кожуха изнутри.

Провести оценку эффективности экрана, окружающего данный источник излучения. Размеры камеры  $A \times B \times C$ . Экран изготовлен из медной сетки. Диаметр проволоки  $D_0$  мм, шаг сетки  $d$  мм.

Таблица 171. Варианты данных для выполнения задания

Номер варианта	$P_{\text{изл}}$ , Вт	$\lambda$ , см	$G_0$	$A$ , м	$B$ , м	$C$ , м	$D_0$ , мм	$d$ , мм
1	5	5	500	3	2	1,5	0,2	20
2	10	10	660	2	1,5	1	0,1	15
3	15	15	1000	1,5	1	1	0,05	10
4	20	20	500	2	1,5	1	0,1	10
5	30	3	1000	1,5	1,5	1,5	0,2	10
6	40	20	1500	2	1	1	0,3	15
7	30	30	2000	3	2	1	0,4	20
8	5	40	400	2	1,5	0,5	0,5	12
9	10	30	200	1,5	1,5	1,5	0,1	5
10	15	20	100	0,7	0,7	0,7	0,2	10
11	20	10	50	1	1	1	0,3	12
12	30	5	40	0,5	1	1,5	0,4	15
13	40	3	20	1,5	1	0,5	0,5	20
14	50	2	10	2	2	2	0,6	25
15	60	100	100	3	3	3	0,1	5
16	5	200	200	3,5	2	1	0,05	3
17	10	70	300	2	1	1	0,01	2
18	15	30	400	1	0,5	0,5	0,02	4
19	20	10	500	1	1	1	0,03	10
20	30	15	600	1,5	1,5	1,5	0,04	15
21	50	20	700	2	1	0,5	0,05	20
22	60	30	800	3	1,5	1	0,06	25
23	70	40	900	3,5	1	1,5	0,07	30
24	80	50	1000	1	1	1	0,1	40
25	100	100	500	2	1	0,5	0,2	30
26	90	90	400	1	1,5	1	0,3	20
27	80	80	300	0,5	0,5	1	0,4	15
28	70	70	200	1,5	1	1	0,5	10
29	60	50	100	2	2	2	0,6	15
30	50	40	50	0,5	1	1,5	0,7	20

## Контрольные вопросы

1. От каких основных параметров зависит характер воздействия на человека электромагнитных полей?
2. Какие вредные воздействия оказывает переменное электрическое поле на организм человека?
3. Какой нормативный документ регламентирует воздействие электромагнитного поля на организм человека?
4. Перечислите основные природные источники электромагнитных волн.
5. Сколько выделяют групп антропогенных источников электромагнитных полей?
6. Какие источники относят к первой группе антропогенных источников?
7. Какие источники относят ко второй группе антропогенных источников?
8. Приведите примеры источников электромагнитных полей промышленной частоты в жилых помещениях.
9. Какие инженерно-технические средства защиты от электромагнитных полей применяются для работников?
10. В чем суть экранирования?
11. Каков принцип действия поглощающих экранов?
12. В чем заключается принцип действия отражающих экранов?
13. Что такое энергетическая экспозиция электрического поля и как она определяется?
14. Что такое энергетическая экспозиция магнитного поля и как она определяется?
15. Какими параметрами характеризуется электромагнитное поле?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе; вентиляция промышленных помещений и общественных зданий; защита от вибрации; безопасность лазерного излучения; производственное освещение; производственные опасности и вредности, их идентификация и анализ; прогнозирование масштабов заражения СДЯВ при авариях на опасных объектах и транспорте; шум и защита от электромагнитных полей.

Книга носит рекомендательный характер, включает в себя все необходимые сведения для изучения дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» для всех направлений бакалавриата, может быть полезна при выполнении лабораторных и практических работ.

Для самостоятельного и дополнительного изучения студентам рекомендуется ознакомиться с методом расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории, описанным в ГОСТ Р 56162-2019.

Кафедра автомобильного транспорта, безопасности и управления качеством ВлГУ будет содействовать внедрению лучших выпускных квалификационных работ в практическую деятельность предприятий и учреждений Владимирской области, связанных с охраной труда и специальной оценкой условий труда.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 273 от 06.06.2017 г. «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов (загрязняющих) вредных веществ в атмосферном воздухе» [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 01.09.2022).

2. СП 131.13330.2012. Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095546> (дата обращения: 04.09.2022).

3. СП 20.13330.2011. СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/6180787/> (дата обращения: 05.09.2022).

4. Правила разработки и утверждения методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 16.05.2016 № 422 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2016. – № 21. – Ст. 3018 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420355212> (дата обращения: 06.09.2022).

5. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ Ст. 69 [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/) (дата обращения: 07.09.2022).

6. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901865554> (дата обращения: 10.09.2022).

7. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов, утв. постановлением глав. гос. санитар. врача Рос. Федер. от 25.09.2007 № 74 (зарегистрировано в Минюсте России 25.01.2008, регистрац. № 10995) [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902065388/titles/6540IN> (дата обращения: 11.09.2022).

8. ГОСТ 12.1.005-2001. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М. : Госстандарт. – 28 с. [Электронный

ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 12.09.2022).

9. Блохина, О. И. Методические указания и примеры инженерных расчетов для дипломного проектирования раздела «Охрана труда – вентиляция и кондиционирование воздуха / О. И Блохина ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир : ВПИ, 1976. – 78 с.

10. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003 : утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 921/пр (ред. от 30.05.2022) [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573697256> (дата обращения: 14.09.2022).

11. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85 : утв. и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федер. от 03.12.2016 № 891/пр. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 16.09.2022).

12. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1. – М. : Стройиздат, 1992 [Электронный ресурс]. – URL: <https://ventkomplex.ru/prf/Справочник%20проектировщика%20ч.%203.%20Вентиляция.pdf> (дата обращения: 17.09.2022).

13. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 18.09.2022).

14. ГОСТ 25199-82. Оборудование пылеулавливающее. Термины и определения [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/2155040/> (дата обращения: 19.09.2022).

15. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200114239> (дата обращения: 20.09.2022).

16. ГОСТ 9077-82. Кварц молотый пылевидный. Общие технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/6178107/> (дата обращения: 21.09.2022).

17. Справочник проектировщика. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2. – М. : Стройиздат, 1992 [Электронный ресурс]. –

URL: <https://www.proektant.org/books/0124-VHS-1992.pdf> (дата обращения: 22.09.2022).

18. Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха / под общ. ред. И. Г. Староверова. – М. : Стройиздат, 1969 [Электронный ресурс]. – URL: <https://seniga.ru/download/70-uchebnie-materiali/3308-staroverov-ig-spravochnik-proektirovschika.html> (дата обращения: 23.09.2022).

19. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зданий / В. П. Титов [и др.]. – М. : Стройиздат, 1985. – 208 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://bookree.org/reader?file=531436> (дата обращения: 24.09.2022).

20. Постановление «Об утверждении санитарных правил СП 2.2.3670-20 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда"» [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573230583> (дата обращения: 25.09.2022).

21. ГОСТ 12.1.012-2004. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200059881> (дата обращения: 26.09.2022).

22. ГОСТ 26568-85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009518> (дата обращения: 27.09.2022).

23. ГОСТ 12.1.040-83. Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200311> (дата обращения: 28.09.2022).

24. СП. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200029357> (дата обращения: 29.09.2022).

25. ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023782> (дата обращения: 30.09.2022).

26. ГОСТ 12.4.026-2015. Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_207653/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207653/) (дата обращения: 01.10.2022).

27. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 03.10.2022).

28. СП 131.13330.2020ю Строительная климатология СНИП 23-01-99\* [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 04.10.2022).

29. ГОСТ Р 58967-2020. Ограждения инвентарные строительных площадок и участков производства строительно-монтажных работ. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174798> (дата обращения: 05.10.2022).

30. ГОСТ ISO 9612-2016. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=20954#DwdxvLT0KJpdcPzz> (дата обращения: 06.10.2022).

31. СанПиН 1.2.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177> (дата обращения: 07.10.2022).

32. ГОСТ 20444-2014. Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/71102668/> (дата обращения: 08.10.2022).

33. ГОСТ 27435-87. Внутренний шум автотранспортных средств. Допустимые уровни и методы измерений [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009805> (дата обращения: 09.10.2022).

34. СН 2963-84. Временные санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых радиотехническими объектами [Электронный ресурс]. – URL: <https://data.normacs.ru/Doclist/doc/121N4.html> (дата обращения: 10.10.2022).

35. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901865556> (дата обращения: 11.10.2022).

36. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200272> (дата обращения: 12.10.2022).

37. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/4179040/> (дата обращения: 13.10.2022).

38. ГОСТ 12.1.002-84. Система стандартов безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200271> (дата обращения: 14.10.2022).

39. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133726> (дата обращения: 15.10.2022).

40. ГОСТ 618-2014. Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200119478> (дата обращения: 16.10.2022).

41. ГОСТ 5638-2018. Фольга медная рулонная для технических целей. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160834> (дата обращения: 17.10.2022).

42. ГОСТ 5336-80. Сетки стальные плетеные одинарные. Технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005106> (дата обращения: 18.10.2022).

43. ТУ 21-54-41-73. Экранирующие материалы для изготовления средств защиты от ЭМИ РЧ в диапазоне частот 30 МГц – 40 ГГц [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/1571282/3e22e51c74db8e0b182fad67b502e640/> (дата обращения: 19.10.2022).

44. ТУ 17 РСФСР 60-11023-85. Ткань хлопчатобумажная с микропроводом [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.docum.ru/tu.asp?id=667979> (дата обращения: 20.10.2022).

45. ТУ6-06-С202-90. Ткань трикотажная [Электронный ресурс]. – URL: <https://promtehtkani.ru/ткани-технические-специальные/> (дата обращения: 21.10.2022).

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Использованные обозначения

- $a_N$  – безразмерный коэффициент трансформации;
- $a_0$  – полуширина гряды, холма, ложбины или протяженность бокового склона уступа, м;
- $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;
- $b$  – ширина устья прямоугольного источника выброса, м;
- $b_{\Pi}$  – поперечный размер теплового источника выброса (например, расстояние между крайними двигателями в случае воздушного судна), м;
- $b_1, b_2$  и  $b_3$  – вспомогательные коэффициенты для расчета безразмерного коэффициента  $s_z$ ;
- $c$  – приземная разовая концентрация ЗВ, мг/м;
- $C$  – приземная концентрация ЗВ, осредненная за длительный период (долгопериодная средняя концентрация), мг/м<sup>3</sup>;
- $c(x, y, z), C(x, y, z)$  – концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке  $(x, y, z)$  точечным источником выброса, находящимся в точке  $(\xi, \eta, \varsigma)$  отрезка  $L$ , мг/м<sup>3</sup>;
- $c(x, y), C(x, y)$  – концентрация ЗВ, создаваемая в расчетной точке  $(x, y)$  точечным источником выброса, находящимся в точке  $(\xi, \eta)$  области  $S$ , мг/м<sup>3</sup>;
- $\hat{c}$  – приземная концентрация ЗВ, рассчитанная с учетом влияния застройки, мг/м<sup>3</sup>;
- $c_{\text{кр}}$  – концентрация ЗВ на крыше здания в точке с координатами  $(x, y)$  относительно источника выброса, мг/м<sup>3</sup>;
- $\hat{c}_m$  – максимальная приземная разовая концентрация ЗВ при учете влияния застройки, мг/м<sup>3</sup>;
- $c'_m$  – максимальная приземная концентрация ЗВ, определяемая для многоствольной трубы при параметрах выброса для одного ствола и при мощности выброса, равной суммарной мощности выброса из всех стволов, мг/м<sup>3</sup>;
- $c''_m$  – максимальная приземная концентрация ЗВ, рассчитываемая для многоствольной трубы при суммарной мощности выброса из всех стволов и эффективном диаметре  $D_э$ , мг/м<sup>3</sup>;

$C_{м.и}$  – максимальная приземная концентрация ЗВ при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра  $u$ , отличающейся от опасной скорости ветра  $u_m$ , мг/м<sup>3</sup>;

$c_{р.в}$  – удельная теплоемкость атмосферного воздуха при постоянном давлении, кДж/(кг · К), кал/(г · °С);

$C_{ст}$  – концентрация ЗВ в точке наветренной стены на высоте  $z$  над подстилающей поверхностью при скорости ветра  $u$ , мг/м<sup>3</sup>;

$c_{ф}, C_{ф}$  – разовая и осредненная за длительный период концентрации ЗВ, характеризующие фоновое загрязнение атмосферного воздуха от неучтенных источников выбросов, мг/м<sup>3</sup>;

$c_{фр}$  и  $c_{фг}$  – фоновые концентрации ЗВ, соответствующие времени осреднения от 20 до 30 мин и 1 год, мг/м<sup>3</sup>;

$c'_{фр}, c'_{фг}$  – фоновые концентрации ЗВ  $c_{ф}$ , из которых исключен вклад рассматриваемого источника, мг/м<sup>3</sup>;

$c_i$  – рассчитанная в соответствии с требованиями настоящих Методов концентрация  $i$ -го ЗВ, входящего в рассматриваемую группу ЗВ комбинированного вредного действия, мг/м<sup>3</sup>;

$C$  – приземная концентрация ЗВ, осредненная за длительный период (год, сезон), мг/м<sup>3</sup>;

$C_r$  – приземная среднегодовая концентрация ЗВ (концентрация, осредненная за 1 год), мг/м<sup>3</sup>;

$C_j(r_p, \varphi)$  – средняя концентрация ЗВ для каждого из интервалов продолжительностью  $\tau_j$ , мг/м<sup>3</sup>;

$c_l, C_l$  – разовая и осредненная за длительный период концентрации ЗВ от линейного источника выброса, расположенного вдоль отрезка  $L$  трехмерной кривой, мг/м<sup>3</sup>;

$C_{max}$  – максимальная концентрация ЗВ, осредненная за длительный период, мг/м<sup>3</sup>;

$c_s, C_s$  – разовая и осредненная за длительный период концентрации ЗВ от площадного источника выброса, занимающего область  $S$  площадью  $S_{п}$ , мг/м<sup>3</sup>;

$c_v$  – концентрация ЗВ от расположенного вблизи подстилающей поверхности объемного источника выброса, занимающего область  $V$  объемом  $|V|$ , мг/м<sup>3</sup>;

$c_y$  – приземная концентрация ЗВ в атмосферном воздухе на расстоянии  $y$  по нормали к оси факела выброса, мг/м<sup>3</sup>;

$c_z$  – концентрация ЗВ на разных высотах  $z$  над подстилающей поверхностью, мг/м<sup>3</sup>;

$c_1, c_2, \dots, c_N, (C_1, C_2, \dots, C_N)$  – разовая и осредненная за длительный период концентрации ЗВ соответственно от первого, второго, ...,  $N$ -го источника выбросов, расположенных с наветренной стороны при рассматриваемом направлении ветра, мг/м<sup>3</sup>;

$c'_1, c'_2$  – приземные концентрации ЗВ от источников выброса, высоты которых соответственно равны  $H_1$  и  $H_2$ , мг/м<sup>3</sup>;

$C_l$  – среднегодовой квадрат концентрации ЗВ;

$C'(r_p, \varphi)$  – функция для вычисления осредненных приземных концентраций ЗВ;

$d$  – безразмерный коэффициент, используемый при расчете  $x_m$ ;

$d_1$  – безразмерный коэффициент, используемый при расчете концентрации ЗВ от многоствольной трубы;

$d_2$  – безразмерный коэффициент, рассчитываемый в зависимости от отношения  $v_p/u$  и параметра  $f$  по формулам (108а), (108б);

$d_g$  – диаметр частиц аэрозолей, определяемый так, что масса всех частиц диаметром больше  $d_g$  составляет 5 % общей массы частиц, м;

$D$  – диаметр устья источника выброса, м;

$D_э$  – эффективный диаметр устья источника выброса, м;

$f, v_m, v'_m$  и  $f_e$  – комплексные параметры, входящие в расчетные формулы;

$F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ (аэрозолей, пыли) в атмосферном воздухе;

$F(u, \lambda)$  – функция, характеризующая изменчивость мощности  $M$  выбросов в зависимости от метеопараметров по отношению к ее характерной (например, средней) мощности;

$f_b, f_m$  – комплексные характеристики выброса;

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;

$G_0(\xi, \eta)$  – функция, описывающая изменчивость мощности выброса вдоль линейного источника или в точках площадного/объемного источника по отношению к ее характерной мощности, применяемой при расчете концентрации  $c$  ЗВ;

$G$  – вспомогательная функция;

$G_1 - G_4$  – расчетные параметры для определения подынтегральных функций при расчете долгопериодных средних концентраций;

$h_0$  – высота (глубина) рассматриваемой формы рельефа, м;  
 $H$  – высота устья источника выброса, м;  
 $H_B$  – высота ветровой тени над уровнем земли, м;  
 $H_{BI}, H_{BII}, H_{BIII}$  – максимальные высоты  $H_B$  для теней I, II и III типов соответственно, м;  
 $H_e$  – эффективная высота источника выброса, м;  
 $H_3$  – высота здания, м;  
 $\bar{H}$  – средняя по предприятию высота источников выбросов, м;  
 $H_V$  – высота устья виртуального источника выброса, м;  
 $H_d$  – протяженность динамического участка струи, м;  
 $H_1 = H(1 + 5 \cdot d_2) + z$ ;  
 $H_2 = H(1 + 5 \cdot d_2) - z$ ;  
 $I$  – средняя интенсивность осадков за рассматриваемый период, мм/ч;  
 $I_0 = 1$  мм/ч;  
 $I_B = 0,17$  мм/ч;  
 $k_{кд}$  – безразмерный коэффициент комбинированного вредного действия, установленный в соответствии с законодательством в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения;  
 $k_p$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от  $\eta$  и  $F$ ;  
 $K$  – вспомогательная величина для расчета  $c_m$  при холодных выбросах;  
 $K_{п}$  – число постов мониторинга;  
 $K_1$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена на уровне  $z_1 = 1$  м, м<sup>2</sup>/с;  
 $l$  – среднее расстояние между центрами устьев стволов, определяемое как среднее арифметическое из всех расстояний между парами различных устьев, м;  
 $l_p$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента  $\eta$ ;  
 $L_{а.ф}$  – длина аэрационного фонаря производственного корпуса, м;  
 $L_d$  – длина здания, устанавливаемая в зависимости от направления ветра, м;  
 $L'_d$  – размер наибольшей стороны основания параллелепипеда, аппроксимирующего здание, м;

$L_{\text{дол}}$  – ширина долины, м;  
 $L_{\text{ЗВ}}$  – масштаб длины, характеризующий размеры ветровых теней, м;  
 $L_{\text{уст}}$  – длина устья прямоугольного источника выброса, м;  
 $L_{\text{ш}}$  – ширина здания, устанавливаемая в зависимости от направления ветра, м;  
 $L'_{\text{ш}}$  – размер наименьшей стороны основания параллелепипеда, аппроксимирующего здание, м;  
 $L_{\text{I}}, L_{\text{II}}, L_{\text{III}}$  – протяженности ветровых теней I, II и III типов соответственно, м;  
 $|L|$  – длина отрезка трехмерной кривой, вдоль которого вычисляется интеграл, м;  
 $M$  – масса ЗВ, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени (мощность выброса), г/с;  
 $Ma$  – число Маха, определяемое как отношение  $w_0$  к скорости звука в атмосферном воздухе  $u_{\text{ЗВ}}$ ;  
 $m, n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника;  
 $M(t)$  – мощность точечного источника выброса, который за время осреднения перемещается с положительной скоростью  $v(t)$ , м/с, вдоль отрезка  $L$ ;  
 $M(l), v(l)$  – величины  $M(t)$  и  $v(t)$ , соответствующие тому моменту времени, когда перемещающийся источник выброса находится в точке  $l = (\xi, \eta, \zeta)$ ;  
 $M_i$  – мощность выброса  $i$ -го источника, г/с;  
 $M_{\text{NO}_2}, M_{\text{NO}}$  – мощности выбросов диоксида и оксида азота, осредненные за рассматриваемый период времени, г/с;  
 $M_{(0-10)}, M_{(11-20)}$  и т. д. – суммарные выбросы рассматриваемого предприятия в интервалах высот источников до 10 м включительно, от 11 до 20 м включительно и т. д., г/с;  
 $n_{\text{ЗВ}}$  – число ЗВ, входящих в группу комбинированного вредного действия;  
 $N$  – число источников выбросов (или стволов при выбросе через многоствольную трубу);  
 $p$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $u/u_{\text{м}}$  для расчета  $x_{\text{м.и}}$ ;

$P_j$  – повторяемости румбов розы ветров, соответствующей рассматриваемому интервалу времени ( $P_0$  – повторяемость штилей);

$p_1(\varphi)$  – функция, характеризующая угловое распределение концентрации ЗВ, которая выражается через розу ветров для рассматриваемого периода осреднения;

$p_2(u)$  – плотность вероятностей  $u$ , соответствующая периоду осреднения концентраций ЗВ;

$p_3(\lambda)$  – плотность вероятностей  $\lambda$ , соответствующая периоду осреднения концентраций ЗВ;

$q_k$  – безразмерная концентрация группы веществ, обладающих комбинированным вредным действием;

$q(r_p, u, \varphi_p, \lambda, H_e)$  – подынтегральная функция, используемая для вычисления осредненных приземных концентраций ЗВ;

$Q$  – тепловая мощность источника выброса, вычисленная с учетом неполноты сгорания топлива;

$r$  – безразмерная величина, определяемая в зависимости от отношения  $u/u_m$  для расчета  $c_{м.и}$ ;

$r_3$  – безразмерный коэффициент, описывающий влияние различия в опасных скоростях ветра при наличии здания  $\hat{u}_m$  и при его отсутствии  $u_m$ ;

$r_{m0}$  – коэффициент (масштаб длины), используемый при вычислении осредненных за длительный период концентраций ЗВ;

$r_p, \varphi_p$  – полярные координаты расчетной точки относительно источника выброса;

$s$  – безразмерный коэффициент, описывающий влияние турбулентной диффузии внутри ветровой тени (при  $H < 10$  м коэффициент  $s$  заменяется на  $s_L$ );

$s_H, s_B$  – величины, равные  $s$  при аргументе  $t_1$ , вычисленном при замене  $L_I$  на  $x_H$  и  $x_B$  соответственно;

$s_z$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициентов  $b_1, b_2$  и  $b_3$  для расчета распределения максимальных разовых концентраций  $c_z$  ЗВ на разных высотах;

$s_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $x/x_m$  и коэффициента  $F$ ;

$s_1^H$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от  $x/x_m$  и  $H$  для низких и наземных источников выбросов;

$s_2$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от скорости ветра  $u$  и отношения  $y/x$  по аргументу  $t_y$ ;

$s_3, s_4$  – безразмерные коэффициенты, определяемые в зависимости от отношения  $L_{a.ф}/x'_m$ ;

$S_c$  – суммарная площадь устьев всех действующих стволов,  $m^2$ ;

$S_o$  – фактическая площадь основания здания,  $m^2$ ;

$S_k$  – площади поверхности карьера на указанном уровне,  $m^2$ ;

$T_a$  – средняя абсолютная температура атмосферного воздуха за рассматриваемый период,  $^{\circ}K$ ;

$t_a$  – средняя температура атмосферного воздуха за период времени, использованный при определении функций  $p_1(\varphi)$ ,  $p_2(u)$  и  $p_3(\lambda)$ ,  $^{\circ}C$ ;

$T_r$  – температура выбрасываемой ГВС,  $^{\circ}C$ ;

$T_b$  – температура атмосферного воздуха,  $^{\circ}C$ ;

$u$  – скорость ветра на стандартном уровне флюгера (10 м от уровня земли),  $m/s$ ;

$u_{зв}$  – скорость звука в атмосферном воздухе,  $m/s$ ;

$u_m$  – опасная скорость ветра на стандартном уровне флюгера, при которой достигается наибольшая приземная концентрация ЗВ  $c_m$   $m/s$ ;

$u_{m.p}$  – максимальная расчетная скорость ветра, превышаемая в рассматриваемой местности в среднем многолетнем режиме в 5 % случаев,  $m/s$ ;

$\hat{u}_m$  – опасная скорость ветра при учете влияния застройки,  $m/s$ ;

$u'_m$  – опасная скорость ветра, соответствующая максимальной концентрации  $c'_m$  ЗВ и определяемая при параметрах выброса для одного ствола,  $m/s$ ;

$u''_m$  – опасная скорость ветра, соответствующая максимальной концентрации  $c''_m$  ЗВ и определяемая с учетом  $D = D_3$ ,  $V = V_{13}$ ,  $m/s$ ;

$u_2$  – измеренная в рассматриваемый срок скорость ветра на уровне 2 м,  $m/s$ ;

$v$  – скорость кораблей и воздушных судов, движущихся вдоль траектории  $L$ , м/с;

$v_g$  – скорость гравитационного оседания частиц в атмосферном воздухе, соответствующая  $d_g$ , м/с;

$V$  – суммарный расход выбрасываемой всеми источниками ГВС, м<sup>3</sup>/с;

$V_c$  – коэффициент вариации;

$V$  – коэффициент вариации концентраций ЗВ в рассматриваемой точке;

$V_3$  – фактический объем здания, м<sup>3</sup>;

$V_1$  – расход ГВС, м<sup>3</sup>/с;

$V_{1Э}$  – эффективный расход выходящей в атмосферный воздух в единицу времени ГВС, м<sup>3</sup>/с;

$w_0$  – средняя скорость выхода ГВС из устья источника выброса, м/с;

$w_s$  – вертикальная составляющая осредненной скорости выхода ГВС из устья источника выброса, м/с;

$x$  – расстояние от источника выброса до расчетной точки по оси факела, м;

$x'$  – расстояние вдоль направления ветра от расчетной точки до стены здания, м;

$x_B$  – граница ветровой тени, м;

$x_M$  – расстояние от источника выброса до точки, где достигается максимальная приземная концентрация ЗВ  $c_M$ , м;

$x_{M,ров}$  – расстояние, равное  $x_M$  для рассматриваемого источника выброса в условиях ровной или слабопересеченной местности, т. е. при  $\eta = 1$ , м;

$x_{Mu}$  – расстояние от источника выброса до точки, где при скорости ветра  $u$  и неблагоприятных метеорологических условиях достигается максимальная приземная концентрация ЗВ  $c_{Mu}$ , м;

$\hat{x}_M$  – расстояние от источника выброса, на котором достигается концентрация  $\hat{c}_M$  ЗВ при опасной скорости ветра  $\hat{u}_M$  и опасном направлении ветра, м;

$x'_m$  – расстояние, соответствующее максимальной концентрации  $c'_m$  ЗВ, определяемое при параметрах выброса для одного ствола, м;

$x''_m$  – расстояние, соответствующее максимальной концентрации  $c''_m$  ЗВ, определяемое с учетом  $D = D_э$ ,  $V = V_{1э}$ , м;

$x_0$  – расстояние от середины рассматриваемой формы рельефа при наличии гряды или ложбины и от верхней кромки склона при наличии уступа до источника выброса, м;

$x_k$  – расстояние от подветренной стены здания до источника выброса, м;

$x_H, x_B$  – расстояния от источника выброса до наветренной и подветренной границ подветренной тени, м;

$x_1$  – расстояние от источника выброса, равное  $10 \cdot x_m$ , м;

$x_2$  – расстояние от источника выброса, начиная с которого  $c \leq 0,05$  ПДК<sub>м.р</sub>, м;

$y$  – расстояние по нормали к оси факела выброса, м;

$z$  – высота расчетной точки над подстилающей поверхностью, м;

$\alpha_0$  – коэффициент вымывания рассматриваемого ЗВ твердыми либо жидкими осадками,  $c^{-1}$ ;

$\gamma$  – положительный острый угол между опасным направлением ветра и нормалью к подветренной стене здания, град.;

$\delta$  – полуширина румба;

$\Delta$  – средняя по городу разность между  $\sigma_{k,изм}^2$  и  $\sigma_{k,расч}^2$ ;

$\Delta H$  – начальный подъем факела;

$\Delta_k$  – разность между  $\sigma_{k,изм}^2$  и  $\sigma_{k,расч}^2$ , определяемая для каждого из постов;

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой ГВС  $T_r$  и температурой атмосферного воздуха  $T_B$ , °С;

$\varepsilon_Q$  – часть тепловой мощности источника выброса, затрачиваемая на излучение;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$\eta_m$  – функция, определяемая в зависимости от различных форм рельефа и безразмерных величин  $n_1$  и  $n_2$ ;

$\hat{\eta}$  – безразмерный коэффициент, описывающий изменение структуры воздушного потока при наличии застройки;

$\hat{\eta}_m$  – поправка, учитывающая влияние застройки на величину максимальной концентрации  $\hat{c}_m$  ЗВ;

$\hat{\eta}_{mv}$  – величина, равная  $\hat{\eta}_m$  для источника выброса, расположенного на границе зоны ветровой тени (т. е. в точке с координатой  $x_B$ );

$\varphi_K$  – вспомогательный угол, определяемый в зависимости от отношения  $t_2$ , град.;

$\varphi_1$  – функция, определяемая для различных форм рельефа в зависимости от отношения  $x_0/a_0$ ;

$\varphi_i$  – азимут направления оси факела, соответствующего переносу рассматриваемого ЗВ от источника выброса на расчетную точку, рад;

$\lambda$  – безразмерный параметр, характеризующий условия турбулентного перемешивания;

$\rho_B$  – плотность атмосферного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\sigma_C$  – стандартное отклонение долгопериодных средних концентраций ЗВ;

$\sigma^2$  – дисперсия концентраций ЗВ;

$\sigma_{k,изм}^2$  – дисперсия измеренных концентраций ЗВ;

$\sigma_{k,расч}^2$  – расчетная дисперсия;

$\tau = 1$  с;

$\tau_j$  – продолжительность непересекающихся интервалов, на которые разбивается период осреднения, каждый из которых соответствует изменяющимся в пределах  $\pm 10$  % параметрам выброса;

$\tau_\Sigma$  – общая продолжительность периода осреднения;

$\vartheta_1$  – расчетный коэффициент;

$\zeta_m$  – безразмерный коэффициент, описывающий влияние колебаний направления ветра.

Значения коэффициента  $A$ 

Таблица 1

№ п/п	Регион	Коэффициент $A$
1	Республика Бурятия и Забайкальский край	250
2	Районы европейской территории Российской Федерации южнее $50^\circ$ с. ш., остальные районы Нижнего Поволжья, азиатская территория Российской Федерации, кроме указанных в пп. 1 и 3 настоящей таблицы	200
3	Европейская территория Российской Федерации и Урала от $50^\circ$ с. ш. до $52^\circ$ с. ш. включительно за исключением попадающих в эту зону районов, перечисленных в пп. 1 и 2 настоящей таблицы, а также для районов азиатской территории Российской Федерации, расположенных к северу от Полярного круга и к западу от меридиана $108^\circ$ в. д.	180
4	Европейская территория Российской Федерации и Урала севернее $52^\circ$ с. ш. (за исключением центра европейской территории Российской Федерации)	160
5	Владимирская, Ивановская, Калужская, Московская, Рязанская и Тульская области	140

Для источников выбросов, расположенных на расстоянии менее 3 км от административных границ, разделяющих территории с различными значениями коэффициента  $A$ , в расчетах принимается  $A$ , равное половине суммы указанных значений. При проведении расчетов для российских территорий, расположенных на расстоянии не более 10 км от границы зон с различными коэффициентами  $A$ , значения коэффициента  $A$  могут быть уточнены с учетом климатических и физико-географических условий рассматриваемой местности.

Значение безразмерного коэффициента  $F$ 

Значение безразмерного коэффициента  $F$  при отсутствии данных о распределении на выбросе частиц аэрозолей по размерам определяется следующим образом:

– для газообразных ЗВ и мелкодисперсных аэрозолей диаметром не более 10 мкм  $F = 1$ ;

– для аэрозолей (за исключением мелкодисперсных аэрозолей диаметром не более 10 мкм) при наличии систем очистки выбросов значение безразмерного коэффициента  $F$  приведено в табл. 2.

Таблица 2

Степень очистки	Коэффициент $F$
При среднем эксплуатационном коэффициенте очистки выбросов свыше 90 %	2
То же от 75 до 90 % включительно	2,5
То же менее 75 % или отсутствии очистки выбросов	3

Вне зависимости от эффективности очистки значение коэффициента  $F$  принимается равным 3 при расчетах концентрации пыли в атмосферном воздухе для производств, в выбросах которых содержание водяного пара соответствует температуре точки росы, которая выше используемой в расчетах температуры атмосферного воздуха  $T_B$  на 5 °С и более.

При наличии данных инструментальных измерений распределения в выбросе аэрозолей по размерам определяются следующие показатели:

$d_g$  – диаметр частиц такой, что масса всех частиц диаметром больше  $d_g$  составляет 5 % от общей массы аэрозолей;

$v_g$  – соответствующая  $d_g$  скорость гравитационного оседания частиц в атмосферном воздухе, м/с.

Значение коэффициента  $F$  устанавливается в зависимости от безразмерного отношения  $v_g/u_m$ , где  $u_m$  – опасная скорость ветра (определяется согласно подп. 5.10 гл. 1).

При  $v_g/u_m \leq 0,015$  значение  $F = 1$ , при  $0,015 < v_g/u_m \leq 0,030$  значение  $F = 1,5$ .

Для остальных значений  $v_g/u_m$  коэффициент  $F$  устанавливается согласно табл. 2 настоящего приложения.

**Значения вспомогательных функций, используемых  
для расчета коэффициента рельефа**

Таблица 1

$x_0/a_0$	Значение функции $\varphi_1$ для различных форм рельефа		
	Гряда, гребень, холм	Ложбина, долина, котловина, впадина	Уступ
-4,00	0,025	0,000	0,000
-3,50	0,050	0,000	0,000
-3,00	0,100	0,000	0,000
-2,50	0,150	0,000	0,000
-2,00	0,250	0,000	0,000
-1,75	0,300	0,000	0,000
-1,50	0,500	0,000	0,000
-1,25	0,800	0,000	0,000
-1,00	1,000	0,000	0,000
-0,75	0,800	0,250	0,000
-0,50	0,400	0,600	0,000
-0,25	0,100	0,900	0,000
0,00	0,000	1,000	0,000
0,25	0,100	0,900	0,100
0,50	0,400	0,600	0,400
0,75	0,800	0,250	0,800
1,00	1,000	0,000	1,000
1,25	0,800	0,000	0,800
1,50	0,500	0,000	0,500
1,75	0,300	0,000	0,350
2,00	0,250	0,000	0,250
2,50	0,150	0,000	0,150
3,00	0,100	0,000	0,100
3,50	0,050	0,000	0,075
4,00	0,025	0,000	0,075

Таблица 2

Форма рельефа	$n_2$	Значения коэффициента $\eta_m$ для значений $n_1$				
		До 0,55 включи- тельно	Свыше 0,55 до 1,05 включи- тельно	Свыше 1,05 до 2,95 включи- тельно	Свыше 2,95 до 5 включи- тельно	Свыше 5
Гряда, гребень, холм	От 4 до 5,5 включительно	3,0	2,2	1,4	1,2	1,0
	Свыше 5,5 до 9,5 включительно	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0
	Свыше 9,5 до 15,5 включительно	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
	Свыше 15,5 до 20 включительно	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
Ложбина, долина, котловина, впадина	От 4 до 5,5 включительно	4,0	3,0	1,8	1,4	1,0
	Свыше 5,5 до 9,5 включительно	2,0	1,6	1,5	1,3	1,0
	Свыше 9,5 до 15,5 включительно	1,6	1,5	1,4	1,2	1,0
	Свыше 15,5 до 20 включительно	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0
Уступ	От 4 до 5,5 включительно	3,5	2,7	1,6	1,3	1,0
	Свыше 5,5 до 9,5 включительно	1,8	1,5	1,4	1,2	1,0
	Свыше 9,5 до 15,5 включительно	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0
	Свыше 15,5 до 20 включительно	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0

**Расчетное определение фоновых концентраций ЗВ,  
предназначенных для использования при расчете загрязнения  
атмосферного воздуха**

1. Фоновые концентрации  $c_{\text{фр}}$  ЗВ, предназначенные для использования при расчете загрязнения атмосферного воздуха, определяются расчетным путем с использованием данных о выбросах для тех ЗВ, по которым в расчетах учитывается не менее 95 % суммарного выброса рассматриваемого ЗВ от всех источников города.

2. Фоновая концентрация  $c_{\text{фр}}$  в расчетной точке определяется по формулам (1), (2):

$$c_{\text{фр}} = \frac{C_{\text{г}}}{\sqrt{1 + V^2}} e^{1,2728\sqrt{\ln(1+V^2)}}, \quad (1)$$

$$V^2 = \frac{\sigma^2}{C_{\text{г}}^2}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{г}}$  – среднегодовая концентрация ЗВ в рассматриваемой точке;  
 $\sigma^2$  – дисперсия концентраций, вычисляемая по формуле (3):

$$\sigma^2 = Cl - C_{\text{г}}^2. \quad (3)$$

Величины  $Cl$  и  $V$  являются среднегодовым квадратом концентрации и коэффициента вариации концентраций в рассматриваемой точке. Формулы для расчета  $Cl$  приведены в пп. 3 и 4 настоящего приложения.

Среднегодовая концентрация ЗВ в формулах (1) – (3) настоящего приложения вычисляется на основе формул и положений, приведенных в настоящих Методах, как долгопериодное среднее, соответствующее времени осреднения 1 год и средним климатическим условиям.

Учет фоновых концентраций ЗВ при расчете среднегодовой концентрации  $C$  ЗВ осуществляется в соответствии с положениями п. 11 гл. 1.

3. В случае выброса ЗВ от единственного одиночного точечного источника с постоянными в течение периода осреднения параметрами выброса значение  $Cl$  вычисляется по формуле (4)

$$Cl(r_p, \varphi_p) = \frac{p_1(\varphi) \cdot M^2}{r_p^2} Cl'(r_p, \varphi_p), \quad (4)$$

$$\text{где } Cl'(r_p, \varphi_p) = 0,532 \int_0^{\infty} du \int_0^{\infty} p_2(u) \cdot p_3(\lambda) \cdot \lambda^{-0,5} \times \quad (5)$$

$$\times [q_i(r_p, u, \varphi_p, \lambda, H_e)]^2 d\lambda.$$

Функция  $q_i(r_p, u, \varphi_p, \lambda, H_e)$  вычисляется по формулам, приведенным в подп. 10.5 гл. 1.

В случае выброса ЗВ от единственного одиночного источника с переменными параметрами выброса формула для расчета  $Cl$  имеет вид (6)

$$Cl(r_p, \varphi_p) = \sum_{(j)} \frac{\tau_j}{\tau_{\Sigma}} Cl_j(r_p, \varphi_p), \quad (6)$$

где используются обозначения, приведенные в подп. 10.1.4.3 гл. 1. Значение  $Cl_j$ , относящееся к  $j$ -у интервалу постоянства параметров выброса, вычисляется по формулам (4), (5), приведенным в приложении, с использованием функций  $p_1, p_2, p_3$ , соответствующих этому интервалу.

Для источников, выбросы которых определяются метеорологическими параметрами  $u$  и  $\lambda$  (например, для пылящих поверхностей), под интегралом в формуле (5) добавляется множитель  $[F(u, \lambda)]^2$ , где  $F(u, \lambda)$  – функция, определенная в подп. 10.1.4.1 гл. 1.

4. В случае  $N$  точечных источников выброса значение  $Cl$  в рассматриваемой расчетной точке рассчитывается по формуле (7)

$$Cl(r_p, \varphi_p) = \sum_{i=1}^N \frac{p_1(\varphi_{p.i}) M_i^2}{r_{p.i}^2} Cl'_i + \quad (7)$$

$$+ 2 \sum_{i>j=1}^N \frac{p_1[0,5(\varphi_i + \varphi_j)] M_i M_j}{r_{p.i}^2 r_{p.j}^2} e^{-\frac{0,89(\varphi_i + \varphi_j)^2}{\lambda}} Cl'_{i,j},$$

где  $M_i$  – мощность выброса  $i$ -го источника;

$\varphi_{p.i}$  – азимут направления оси факела, соответствующего переносу рассматриваемого ЗВ от источника выброса на расчетную точку, рад;

$r_{p.i}^2$  – расстояние от расчетной точки до этого источника выброса;

$Cl'_i$  вычисляется по формуле (5), приведенной в настоящем приложении, для  $i$ -го источника выброса при  $\varphi = \varphi_i$  и  $r_p = r_{pi}$ ;

$Cl'_{i,j}$  определяется соотношением (8)

$$Cl'_{i,j} = 0,532 \int_0^{\infty} du \int_0^{\infty} d\lambda p_2(u) p_3(\lambda) \lambda^{-0,5} \times \quad (8)$$

$$\times q_i(r_{pi}, u, \varphi_{pi}, \lambda, H_{ei}) q_i(r_{pj}, u, \varphi_{pj}, \lambda, H_{ej}).$$

При вычислении второй суммы в правой части формулы (7), те слагаемые, для которых  $(\varphi_i - \varphi_j)^2 > 20 \cdot \lambda$ , не учитываются.

5. При наличии данных инструментальных наблюдений за загрязнением воздуха они учитываются следующим образом при расчете  $\sigma^2$ :

– для каждого из  $K_{\Pi}$  постов мониторинга по данным измерений за год рассчитывается дисперсия измеренных концентраций  $\sigma_{k,изм}^2$  ( $k = 1, 2, \dots, K_{\Pi}$ ) и по формуле (3) данного приложения, расчетная дисперсия  $\sigma_{k,расч}^2$ ;

– для каждого из постов определяется разность между  $\sigma_{k,изм}^2$  и  $\sigma_{k,расч}^2$   $\Delta_k$  по формулам (9а) – (9б)

$$\Delta_k = \sigma_{k,изм}^2 - \sigma_{k,расч}^2 \quad \text{при } \sigma_{k,изм}^2 > \sigma_{k,расч}^2, \quad (9а)$$

$$\Delta_k = 0 \quad \text{при } \sigma_{k,изм}^2 \leq \sigma_{k,расч}^2; \quad (9б)$$

– вычисляется средняя по городу разность  $\Delta$  по формуле (9в)

$$\Delta = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \Delta_k; \quad (9в)$$

– полученная постоянная разность  $\Delta$  добавляется к значениям  $\sigma^2$ , вычисленным по формуле (3) для всех расчетных точек.

6. Если вычисленная в расчетной точке фоновая концентрация  $c_{фр}$  оказалась меньше удвоенной среднегодовой концентрации  $C_{г}$ , то фоновая концентрация в этой точке принимается равной  $2C_{г}$ .

**Пример расчета долгопериодных средних концентраций для окислов азота с учетом коэффициента трансформации**

Расчет долгопериодных средних концентраций диоксида азота  $NO_2$  и оксида азота  $NO$  проводится с учетом частичной трансформации  $NO$  в более токсичный  $NO_2$  при среднем за рассматриваемый период времени безразмерном коэффициенте трансформации  $a_N$ . При этом для каждого из включенных в расчет источников на основе исходных данных о выбросах  $NO_2$  и  $NO$  по формуле (1), приведенной ниже, определяется мощность суммарного выброса  $M_{NO_x}$  оксидов азота, пересчитанных к выбросам  $NO_2$ :

$$M_{NO_x} = M_{NO_2} + 1,53 \cdot M_{NO}. \quad (1)$$

Далее по формулам (2а), (2б) для каждого из этих источников определяют пересчитанные значения мощностей выброса  $NO_2$  и  $NO$ , которые используются в дальнейших расчетах вместо исходных выбросов

$$M_{NO_2} = a_N M_{NO_x}, \quad (2a)$$

$$M_{NO} = 0,65(1 - a_N)M_{NO_x}. \quad (2б)$$

Коэффициент  $a_N$  зависит от местных особенностей режима интенсивности коротковолновой, в том числе ультрафиолетовой радиации, фонового содержания в атмосферном воздухе озона  $O_3$ , оксидов азота, различных фракций углеводородов. Значения  $a_N$  для рассматриваемой территории определяются как по расчетным, так и экспериментальным данным.

Для оксидов азота допускается устанавливать в расчетах значение коэффициента частичной трансформации  $NO$  в  $NO_2$  для максимальных разовых концентраций равным 0,8, а для среднегодовых концентраций равным 0,6.

**Приложение 6**

**Значения безразмерного коэффициента  $I_{1\beta}$**

$\beta$	$I_{1\beta}$	$\beta$	$I_{1\beta}$	$\beta$	$I_{1\beta}$	$\beta$	$I_{1\beta}$
-3,4	$7,286 \cdot 10^{-6}$	1,2	1,8830	6,1	0,6595	10,7	0,4822
-3,3	$1,443 \cdot 10^{-5}$	1,3	1,7940	6,2	0,6535	10,8	0,4797
-3,2	$2,804 \cdot 10^{-5}$	1,4	1,7090	6,3	0,6496	10,9	0,4773
-3,1	$5,341 \cdot 10^{-5}$	1,5	1,6270	6,4	0,6419	11,0	0,4749
-3,0	$9,976 \cdot 10^{-5}$	1,6	1,5520	6,5	0,6364	11,1	0,4725
-2,9	$1,827 \cdot 10^{-4}$	1,7	1,4820	6,6	0,6310	11,2	0,4702
-2,8	$3,282 \cdot 10^{-4}$	1,8	1,4190	6,7	0,6257	11,3	0,4679
-2,7	$5,780 \cdot 10^{-4}$	1,9	1,3620	6,8	0,6205	11,4	0,4656
-2,6	$1,016 \cdot 10^{-3}$	2,0	1,3100	6,9	0,6155	11,5	0,4633
-2,5	$1,742 \cdot 10^{-3}$	2,1	1,2640	7,0	0,6105	11,6	0,4611
-2,4	$2,936 \cdot 10^{-3}$	2,2	1,2220	7,1	0,6057	11,7	0,4589
-2,3	$4,862 \cdot 10^{-3}$	2,3	1,1840	7,2	0,6010	11,8	0,4568
-2,2	$7,763 \cdot 10^{-3}$	2,4	1,1500	7,3	0,5964	11,9	0,4547
-2,1	0,0122	2,5	1,1190	7,4	0,5919	12,0	0,4526
-2,0	0,0187	2,6	1,0900	7,5	0,5874	12,1	0,4505
-1,9	0,0281	2,7	1,0640	7,6	0,5831	12,2	0,4484
-1,8	0,0416	2,8	1,0390	7,7	0,5789	12,3	0,4464
-1,7	0,0603	2,9	1,0170	7,8	0,5747	12,4	0,4444
-1,6	0,0858	3,0	0,9956	7,9	0,5707	12,5	0,4425
-1,5	0,1198	3,1	0,9758	8,0	0,5667	12,6	0,4405
-1,4	0,1642	3,2	0,9572	8,1	0,5628	12,7	0,4386
-1,3	0,2208	3,3	0,9396	8,2	0,5590	12,8	0,4367
-1,2	0,2913	3,4	0,9229	8,3	0,5552	12,9	0,4348
-1,1	0,3774	3,5	0,9072	8,4	0,5515	13,0	0,4330
-1,0	0,4800	3,6	0,8922	8,5	0,5479	13,1	0,4311
-0,9	0,5995	3,7	0,8779	8,6	0,5443	13,2	0,4293
-0,8	0,7353	3,8	0,8643	8,7	0,5409	13,3	0,4275
-0,7	0,8859	3,9	0,8513	8,8	0,5374	13,4	0,4258
-0,6	1,0490	4,0	0,8388	8,9	0,5341	13,5	0,4240
-0,5	1,2200	4,1	0,8269	9,0	0,5308	13,6	0,4223
-0,4	1,3950	4,2	0,8154	9,1	0,5275	13,7	0,4206
-0,3	1,5690	4,3	0,8044	9,2	0,5243	13,8	0,4189
-0,2	1,7360	4,4	0,7939	9,3	0,5212	13,9	0,4173
-0,1	1,8900	4,5	0,7837	9,4	0,5181	14,0	0,4156
0,0	2,0260	4,6	0,7739	9,5	0,5151	14,1	0,4140
0,1	2,1410	4,7	0,7644	9,6	0,5121	14,2	0,4124
0,2	2,2300	4,8	0,7553	9,7	0,5091	14,3	0,4108
0,3	2,2910	4,9	0,7465	9,8	0,5063	14,4	0,4092
0,4	2,3240	5,0	0,7379	9,9	0,5034	14,5	0,4076
0,5	2,3310	5,1	0,7297	10,0	0,5006	14,6	0,4061
0,6	2,3120	5,6	0,6920	10,2	0,4952	14,7	0,4046
0,7	2,2720	5,7	0,6852	10,3	0,4925	14,8	0,4030
0,8	2,2140	5,8	0,6785	10,4	0,4899	14,9	0,4016
0,9	2,1420	5,9	0,6720	10,5	0,4873	15,0	0,4001
1,0	2,0600	6,0	0,6656	10,6	0,4847		

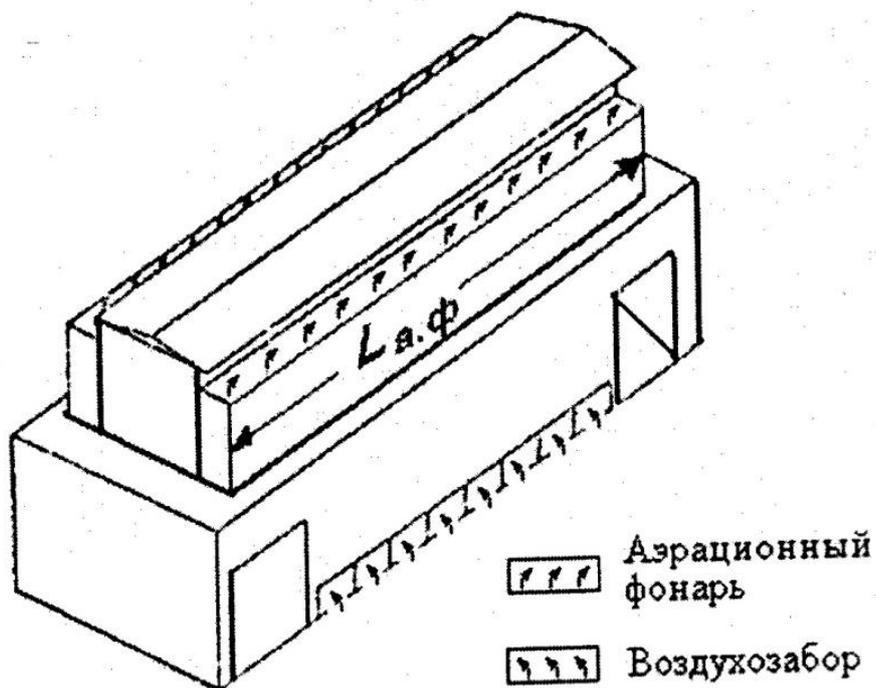


Рис. 1

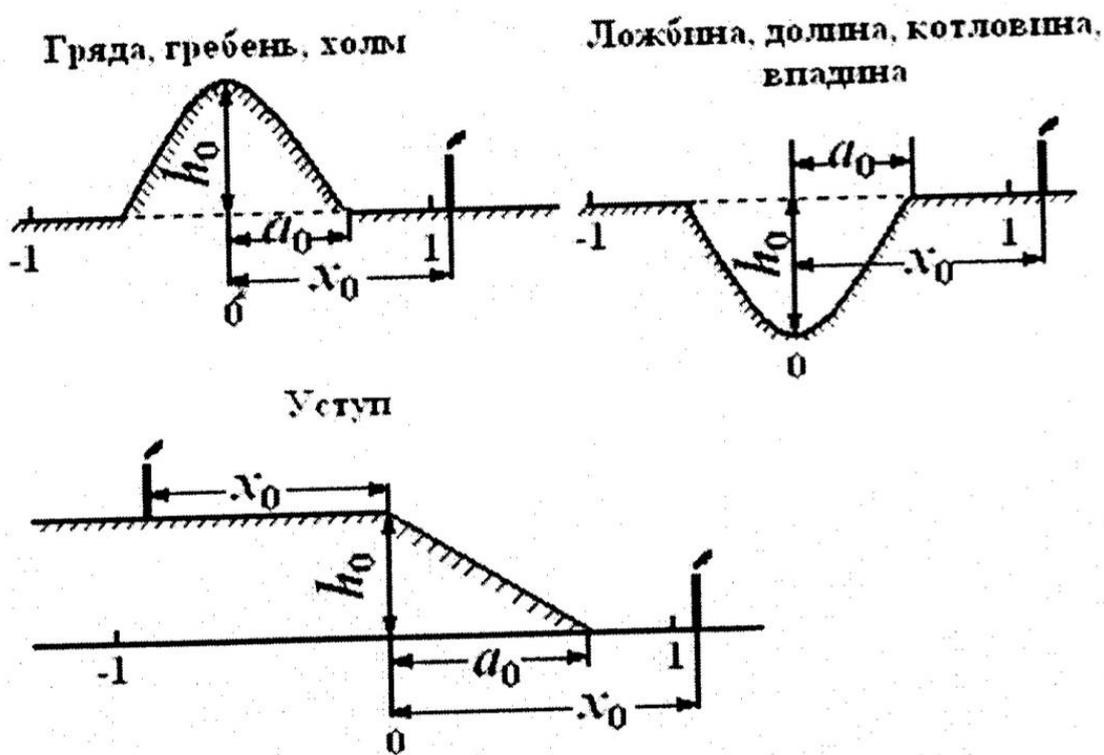


Рис. 2

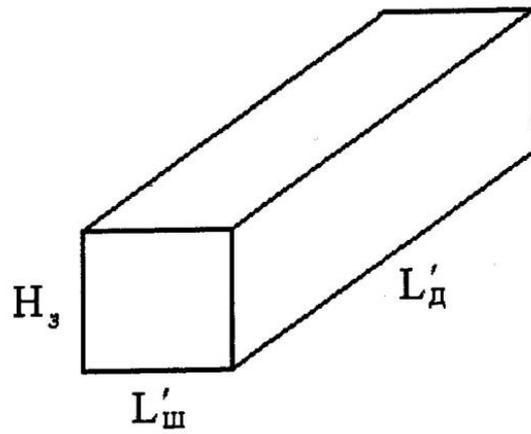


Рис. 3

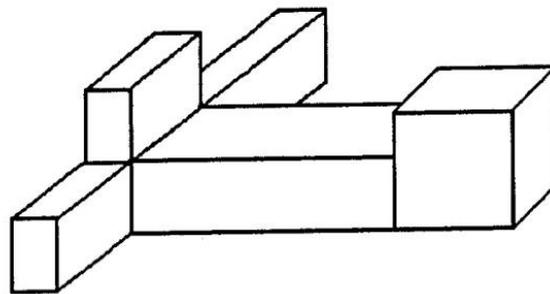


Рис. 4

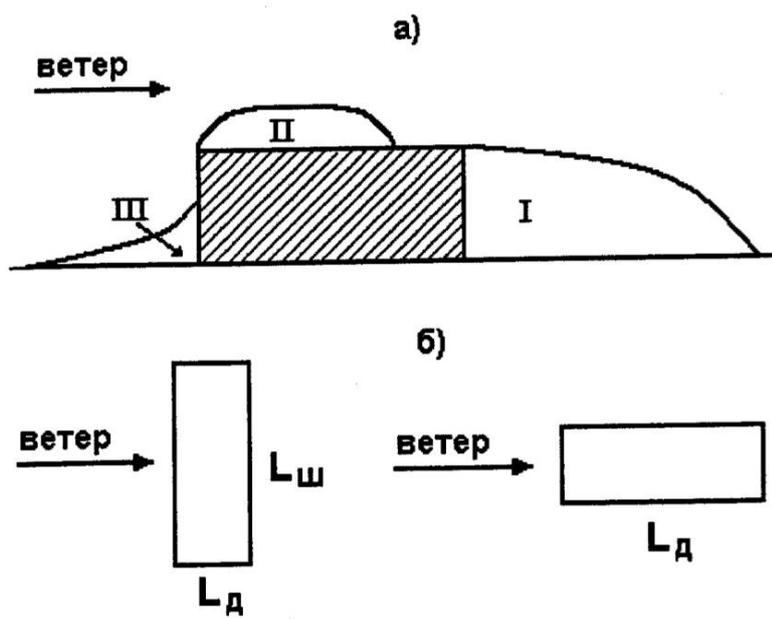


Рис. 5

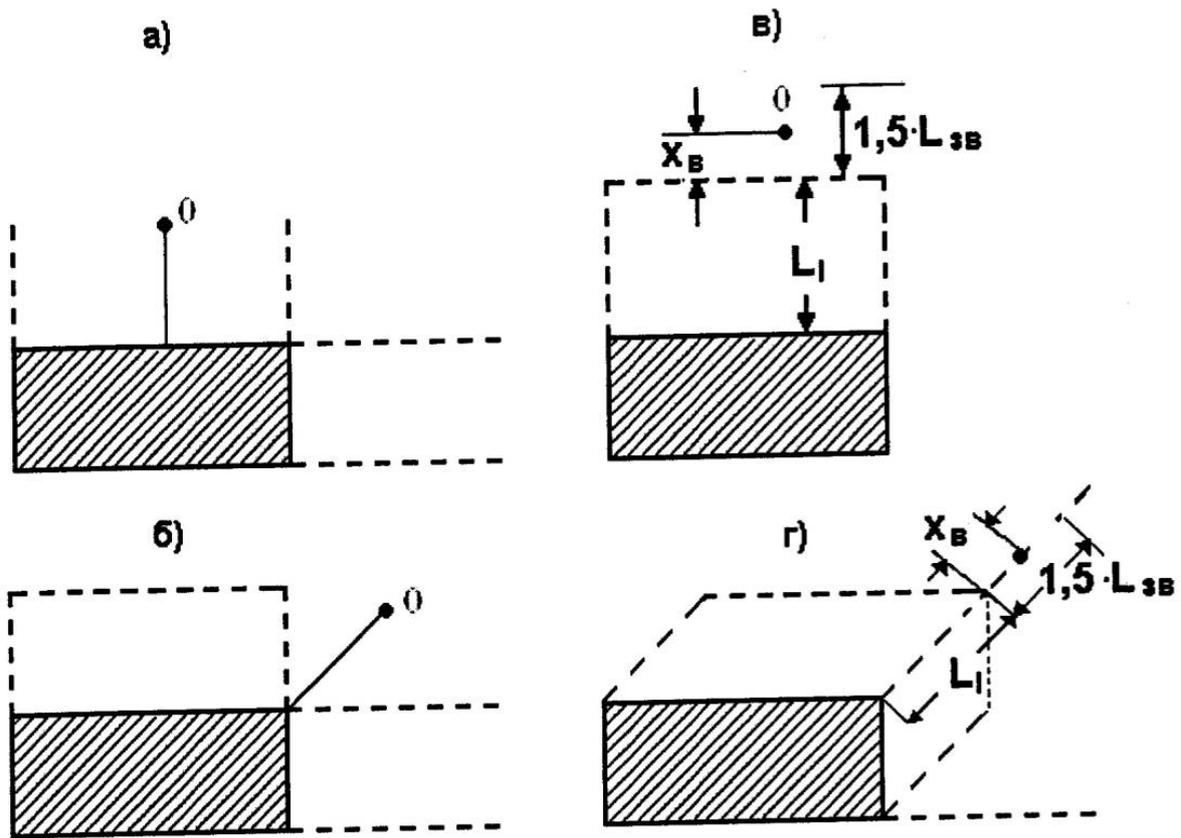


Рис. 6

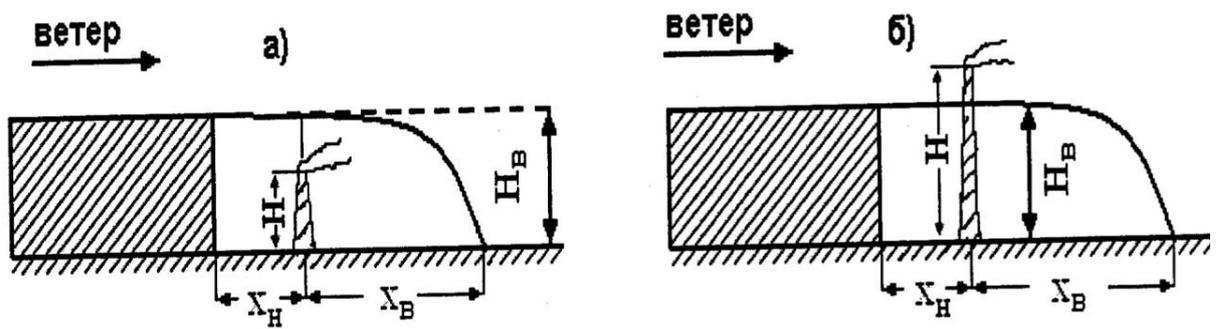


Рис. 7

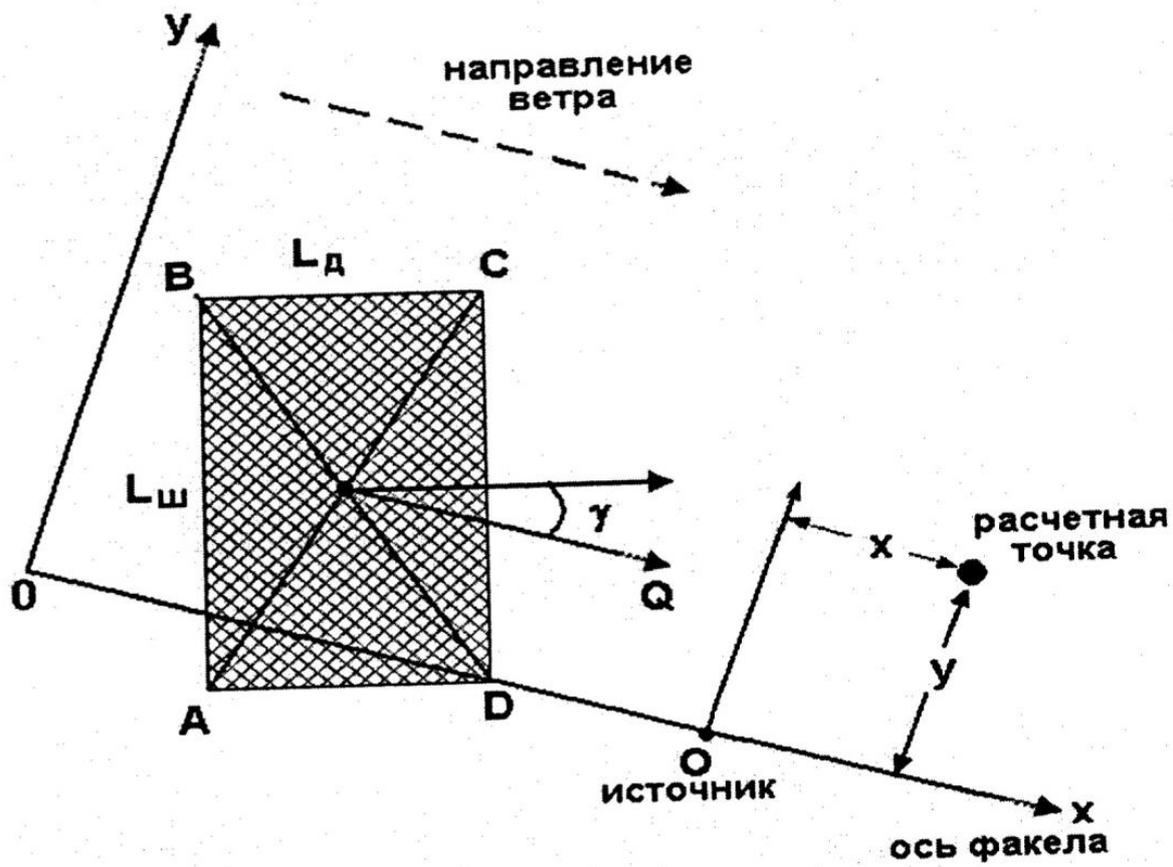


Рис. 8

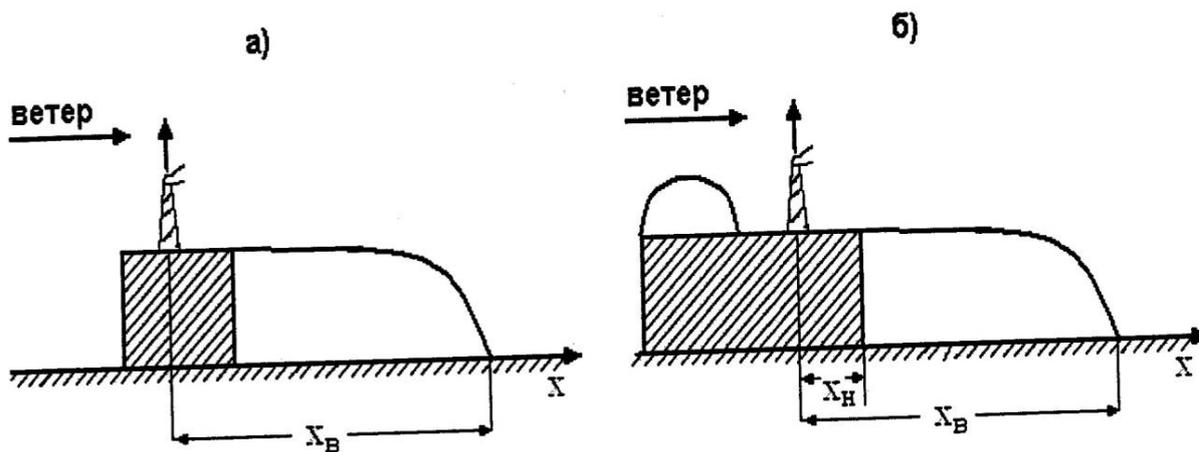


Рис. 9

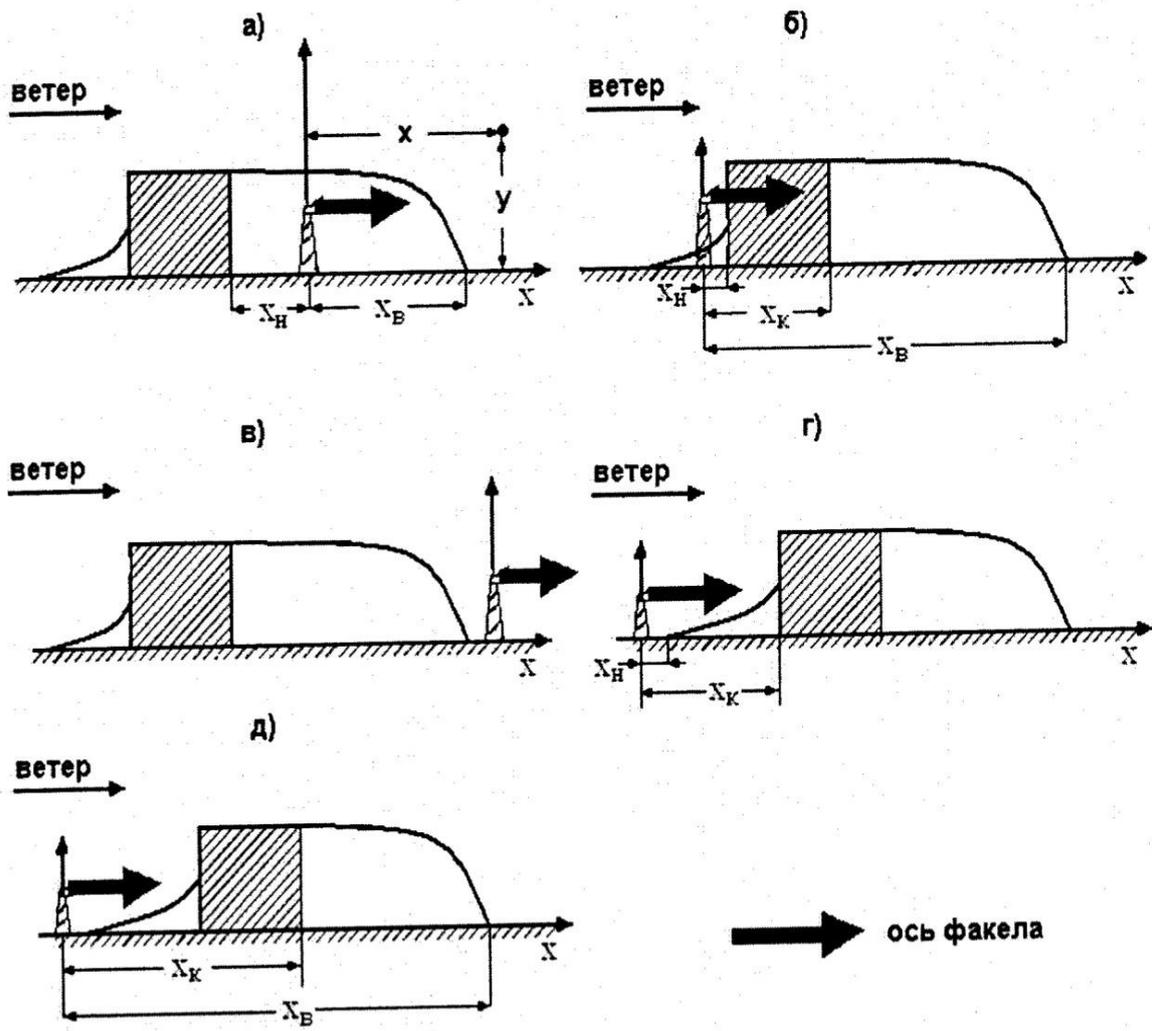


Рис. 10

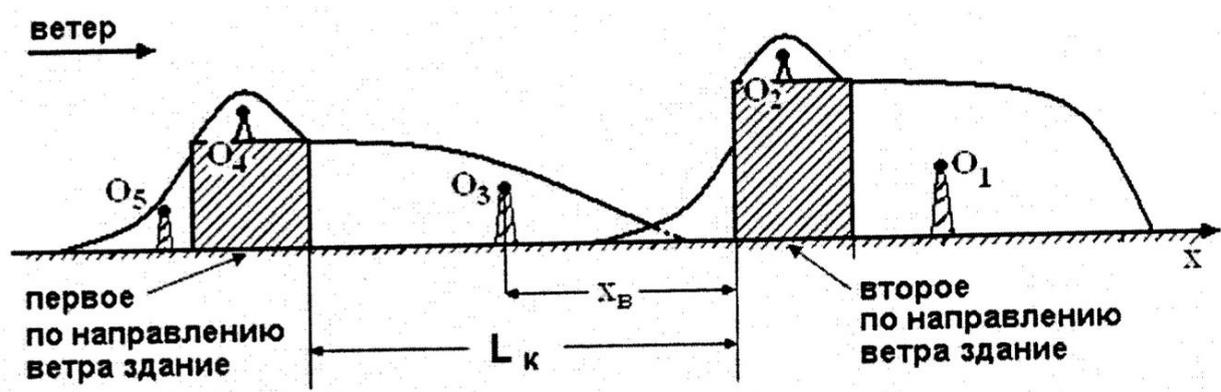


Рис. 11

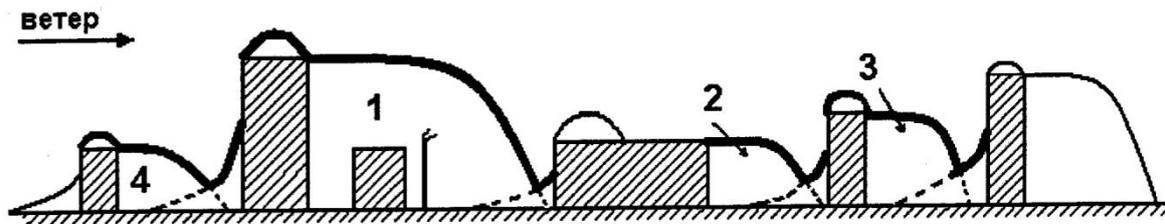


Рис. 12

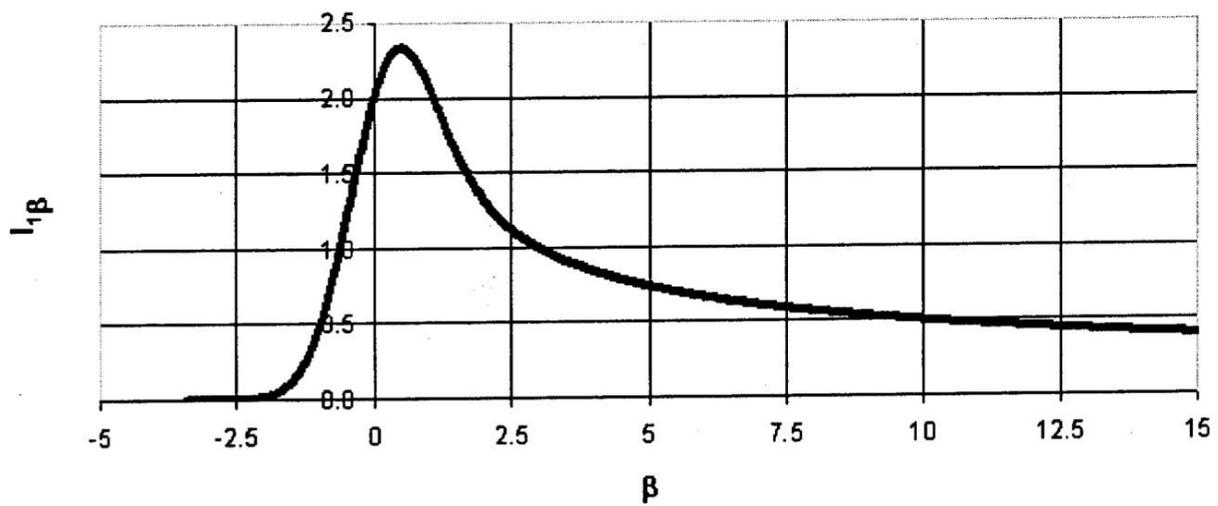


Рис. 13

*Учебное электронное издание*

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Учебное пособие

Авторы-составители:

ТОЛКОВ Алексей Владимирович

БАЛАНДИНА Елена Алексеевна

ТУМАНОВА Нина Ивановна

Редактор А. П. Володина

Технические редакторы Ш. Ш. Амирсейидов, О. В. Балашова

Компьютерная верстка Е. А. Герасиной

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

**Системные требования:** Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;  
дисковод CD-ROM.

**Тираж 11 экз.**

Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
Изд-во ВлГУ  
rio.vlgu@yandex.ru

Институт машиностроения и автомобильного транспорта  
кафедра автомобильного транспорта, безопасности и управления качеством  
obdd2011@mail.ru