

**ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ
ПО ОХРАНЕ ТРУДА
И ТЕХНИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ**

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ОХРАНЕ ТРУДА И ТЕХНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*Рекомендовано
учебно-методическим объединением высших учебных заведений
Республики Беларусь по образованию в области
природопользования и лесного хозяйства в качестве
учебно-методического пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по химико-технологическим специальностям*

Минск 2007

УДК 331.452(075.8)
ББК 65.9(2)248я7
И-62

Авторы:

Б.Р. Ладик, В.М. Сацура,
И.Т. Ермак, А.А. Челноков

Рецензенты:

начальник Центра охраны труда и технической безопасности
Института «Кадры индустрии» профессор *Ю.В. Тищенко*;
заведующий кафедрой охраны труда БНТУ профессор,
доктор технических наук *А.М. Лазаренков*

**Инженерные расчеты по охране труда и технической
И-62 безопасности** : учеб.-метод. пособие для студентов химико-
технологических специальностей / Б. Р. Ладик [и др.]. –
Минск: БГТУ, 2007. – 86 с.

ISBN 978-985-434-702-8

Пособие содержит теоретические основы по созданию безопасных
условий труда, а также типовые методики инженерных расчетов по
технической безопасности и справочные данные для этих расчетов.

УДК 331.452(075.8)
ББК 65.9(2)248я7

ISBN 978-985-434-702-8

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Организация современного производства немыслима без четкого соблюдения правил техники безопасности и производственной санитарии.

В комплексной системе мер по созданию благоприятных условий труда и повышению его безопасности важная роль принадлежит научно обоснованным инженерным расчетам, внедрению прогрессивных технологических процессов. Данные вопросы решаются на всех этапах технологической подготовки производства – от разработки планировочных решений, проектов и технологических процессов до внедрения их в производство. Необходима значительная работа по приведению эксплуатируемого оборудования, машин, механизмов в соответствие с требованиями правил и норм охраны труда. Для решения этой задачи необходимо владение навыками инженерных расчетов по безопасности труда.

В настоящем пособии приведены методы расчета границ опасных зон, ограждений, предохранительных муфт, предохранительных клапанов, мембран, сосудов и аппаратов, работающих под давлением, теплоизоляции, защитного заземления, зануления и другие расчеты.

Учебно-методическое пособие может быть использовано студентами очной и заочной форм обучения для практических занятий, выполнения дипломных проектов и контрольных работ.

Пособие написано преподавателями кафедры безопасности жизнедеятельности БГТУ: раздел 1 – Б. Р. Ладиком, 2 – А. А. Челноковым, 3, 5 – И. Т. Ермаком, 4 – В. М. Сацурой.

1. РАСЧЕТ ОПАСНЫХ ЗОН И УСТРОЙСТВ БЕЗОПАСНОСТИ

1.1. Общие положения

Опасная зона – это пространство, в котором возможно действие на работающего опасного и (или) вредного производственного фактора.

При работах, выполняемых на высоте, опасной зоной считается участок, расположенный под рабочей площадкой; при работе грузоподъемных машин (электротельфера, кран-балки) опасная зона определяется расстоянием возможного отлета груза при обрыве одной из строп.

При работе оборудования опасность локализована в пространстве вокруг движущихся элементов: режущего инструмента, обрабатываемых деталей, зубчатых, ременных и цепных передач, рабочих столов станков, конвейеров и т. д.

Размеры опасной зоны в пространстве могут быть постоянными (зона между вальцами, ремнем и шкивом) и переменными (зона резания при изменении режима и характера обработки, смене режущего инструмента и т. д.).

Наличие опасной зоны может быть обусловлено опасностью поражения электрическим током, воздействием тепловых, электромагнитных и ионизирующих излучений, шумом, вибрацией, ультразвуком, вредными парами и газами, пылью, возможностью травмирования отлетающими частицами материала, инструмента, вылетом обрабатываемой детали и др.

При проектировании и эксплуатации технологического оборудования необходимо предусматривать применение устройств, либо исключающих возможность контакта человека с опасной зоной, либо снижающих эту опасность.

Несмотря на большое разнообразие технологического оборудования по назначению, устройству и особенностям эксплуатации, к нему предъявляются общие требования безопасности, соблюдение которых при конструировании обеспечивает безопасность его эксплуатации. Эти требования сформулированы в ГОСТ 12.2.003 ССБТ [1].

Безопасность производственного оборудования обеспечивается: правильным выбором принципов его действия, кинематических схем, конструктивных решений, параметров рабочих процессов, использованием различных средств защиты.

Средства защиты должны быть, как правило, многофункционального типа, т. е. решать несколько задач одновременно. Так, конструкции машин и механизмов, станин станков должны обеспечивать не только ограждение опасных элементов, но и снижение уровня их шума и вибрации; ограждения режущего инструмента должны совмещаться с системой вытяжной вентиляции и т. п.

Общими требованиями к средствам защиты являются: создание наиболее благоприятных для организма человека соотношений с окружающей внешней средой; высокая степень защитной эффективности; учет индивидуальных особенностей оборудования и инструмента; надежность; прочность; удобство обслуживания машин и механизмов.

Все применяемые в конструкциях машин и механизмов средства защиты по принципу действия можно разделить на оградительные, предохранительные, блокирующие, сигнализирующие и специальные.

Оградительные средства препятствуют появлению человека в опасной зоне. Конструктивные решения оградительных устройств многообразны. Они зависят от вида оборудования, расположения человека в рабочей зоне, специфики опасных и вредных производственных факторов. Оградительные устройства могут быть стационарными, подвижными и переносными. Например, стационарные оградительные устройства изготавливают таким образом, чтобы они пропускали обрабатываемую деталь, но не пропускали руки работающего из-за небольших размеров технологического проема.

Подвижные ограждения блокируются с рабочими органами механизма и закрывают доступ в опасную зону при выполнении рабочих операций (наступление опасного момента).

Переносные ограждения являются временными. Их используют при ремонтных и наладочных работах.

Конструкция и материал ограждающих устройств определяются особенностями данного оборудования и технологического процесса. Ограждения выполняют в виде сварных или литых кожухов, жестких сплошных щитов, сеток на жестком каркасе. В качестве материала для ограждений используют металлы, пластмассы, дерево, органическое стекло и т. п.

Чтобы выдерживать нагрузки от отлетающих при обработке частиц, разрушающихся в процессе работы инструментов, возможного вылета обрабатываемых деталей, ограждения должны быть достаточно прочными и надежно крепиться.

Одним из видов предохранительных средств являются слабые звенья в конструкциях технологического оборудования, рассчитанные на разрушение или срабатывание при перегрузках. Срабатывание слабого звена приводит к останову механизма при аварийных режимах работы оборудования. К слабым звеньям относятся: срезные штифты и шпонки, соединяющие вал с маховиком, шестерней или шкивом; фрикционные муфты, не передающие вращение при чрезмерных крутящих моментах; разрывные мембраны в установках с повышенным давлением и т. п.

Слабые звенья делятся на две основные группы: системы с автоматическим восстановлением кинематической цепи (фрикционные, кулачковые муфты) и системы с восстановлением кинематической цепи путем замены слабого звена (срезные штифты, шпонки).

Важную роль в обеспечении безопасной эксплуатации технологического оборудования играет тормозная техника, позволяющая быстро останавливать валы, шпиндели и прочие элементы, являющиеся потенциальными источниками опасности. По конструкции тормоза делятся на ленточные, колодочные, дисковые, грузоупорные, центробежные и электрические; по характеру действия – на управляемые и автоматические.

1.2. Методика расчета опасных зон

При работах, выполняемых на высоте, границы опасной зоны, находящейся внизу, определяются горизонтальной проекцией рабочей площадки, увеличенной на расстояние безопасности l , м,

$$l = 0,3 \cdot H, \quad (1.1)$$

где H – высота, на которой выполняется работа, м.

Границы опасной зоны, м:

$$L_1 = Ш + l; \quad (1.2)$$

$$L_2 = Д + l, \quad (1.3)$$

где Ш, Д – ширина и длина проекции рабочей площадки, м.

Расстояние безопасности l , м, при падении предметов, имеющих горизонтальную составляющую начальной скорости, рассчитывают по формуле

$$L = S/9,81/m (20H + 0,235H^2) + 0,45V\sqrt{H}, \quad (1.4)$$

где S – площадь поперечного сечения падающего предмета, м^2 , определяется как среднее арифметическое значений площадей наибольшего и наименьшего сечений; m – масса падающего предмета, кг; V – горизонтальная составляющая начальной скорости падения, м/с.

Расчет границ опасной зоны выполняется по формулам (1.2), (1.3), (1.4), и принимается большее из полученных значений.

При работе грузоподъемной машины (электротельфер, кран-балка) размер опасной зоны с учетом возможного отлета груза $L_{\text{оп}}$, м, при обрыве одной из строп (рис. 1.1) определяется по формуле

$$L_{\text{оп}} = 2 \sqrt{h \cdot [l_c (1 - \cos \alpha) + a]}, \quad (1.5)$$

где h – высота подъема груза, м; l_c – длина ветви стропа, м; α – угол между стропами и вертикалью, град.; a – расстояние от центра тяжести груза до его края, м.

Порядок расчета границ опасной зоны при работе на высоте.

1. Определить размеры рабочей площадки.
2. Определить размеры горизонтальной проекции рабочей площадки на рабочую поверхность, находящуюся под площадкой.
3. Определить высоту нахождения рабочей площадки H .
4. По формуле (1.1) определить расстояние безопасности.
5. Найти границы опасной зоны по формулам (1.2) и (1.3).
6. Определить площадь поперечного сечения предмета, падение которого возможно при работе.
7. С учетом характера выполняемых работ принять максимально возможную начальную горизонтальную скорость падающего предмета.
8. По формуле (1.4) определить границы опасной зоны в этом случае.
9. Принять за границы опасной зоны большее из полученных по формулам (1.2), (1.3), (1.4) значений.

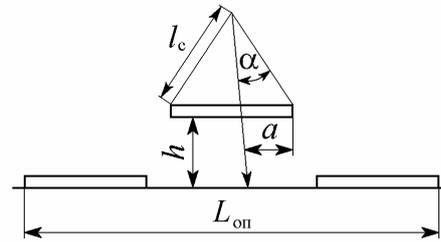


Рис. 1.1. Схема к определению границ опасной зоны при работе грузоподъемной машины

Порядок расчета границ опасной зоны при работе грузоподъемных механизмов.

1. Определить максимально возможную высоту подъема груза.
2. Найти расстояние от центра тяжести груза до его края.
3. Найти длину ветви стропа.
4. Определить угол между стропами и вертикалью.
5. По формуле (1.5) определить размер опасной зоны при обрыве одной из строп.

1.3. Методика расчета ограждений

При расчете сплошных ограждений по действующей ударной нагрузке определяют толщину стенки ограждения.

При разрыве вращающегося инструмента, абразивного круга, вращающейся детали на две части ударная нагрузка на ограждение $P_{уд}$, Н, составляет:

$$P_{уд} = mV^2/(2R_0), \quad (1.6)$$

где m – масса вращающейся детали, инструмента, кг; V – окружная скорость, м/с; R_0 – радиус центра тяжести половины инструмента, круга, детали, м.

Радиус центра тяжести R_0 , м:

$$R_0 = 4(R^3 - r^3) / [3\pi (R^2 - r^2)], \quad (1.7)$$

где R – радиус внешней окружности инструмента, круга, детали, м; r – радиус центрального отверстия инструмента, круга, детали, м.

Ударная сила, которой обладает часть разрушившегося инструмента, разорвавшийся ремень, цепь P , Н, равна:

$$P = m_1V^2 / r_1, \quad (1.8)$$

где m_1 – масса оторвавшейся части, кг; V – окружная скорость, м/с; r_1 – радиус кривизны траектории отрыва, м.

Порядок расчета толщины ограждения инструмента.

1. Определить массу вращающегося инструмента, детали.
2. Вычислить окружную скорость инструмента, детали.
3. По формуле (1.7) рассчитать радиус центра тяжести половины инструмента, детали.
4. По формуле (1.6) рассчитать ударную нагрузку на ограждение при разрыве детали, инструмента.

5. В зависимости от расчетной ударной нагрузки по прил. 1 определить толщину стенки ограждения.

Порядок расчета толщины ограждения цепных и ременных передач.

1. Определить массу оторвавшейся части цепи, ремня.
2. Вычислить окружную скорость цепи, ремня.
3. Определить радиус кривизны траектории отрыва.
4. Рассчитать ударную нагрузку на ограждение от разорвавшегося цепи, ремня.
5. По прил. 1 определить толщину стенки ограждения.

1.4. Методика расчета предохранительных муфт

Муфты со срезными штифтами (рис. 1.2) отличаются компактностью и высокой точностью срабатывания. Недостатком таких муфт является необходимость замены срезанных при перегрузке штифтов.

Расчет муфты заключается в определении диаметра штифтов $d_{шт}$, мм, с учетом их количества z в муфте:

$$d_{шт} = 1,128 \sqrt{T_p K_z / (z R \tau_{в.ср})}, \quad (1.9)$$

где T_p – расчетный крутящий момент, Н·м; K_z – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между штифтами: при числе $z = 1$ $K_z = 1$, при $z = 2$ $K_z = 1,2$, а при $z = 3$ $K_z = 1,3$; R – расстояние между осью передающих момент валов и осью штифта, м; $\tau_{в, ср}$ – предел прочности материала штифта на срез, МПа.

Штифты обычно изготавливают из среднеуглеродистой стали 35, 40, 45.

Для повышения точности срабатывания муфты на штифтах в месте их разрушения протачивается канавка, которая также снижает опасность повреждения полумуфт.

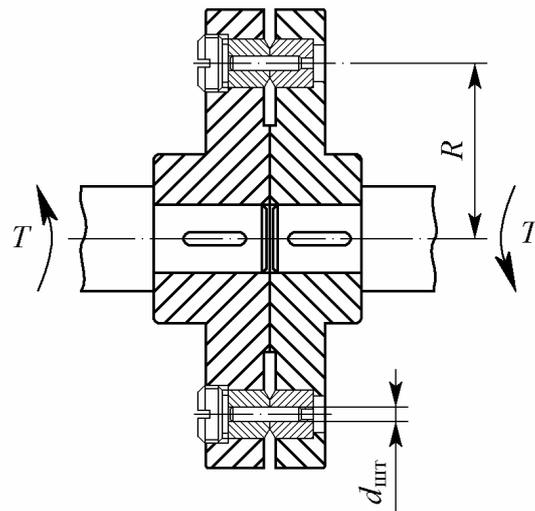


Рис. 1.2. Предохранительная муфта со срезными штифтами

Муфты с одним штифтом имеют более высокую точность срабатывания, но при этом возникают передающиеся на валы поперечные нагрузки, которые можно компенсировать установкой нескольких штифтов.

При определении диаметра штифтов расчетный крутящий момент T_p , Н·м, принимается на 10...25% больше момента, передаваемого муфтой:

$$T_p = (1,1 \dots 1,25)T, \quad (1.10)$$

где T – номинальный крутящий момент, передаваемый муфтой, Н·м.

Предел прочности на срез для материала, из которого изготовлены штифты, $\tau_{в.ср}$, Н·м, принимают: для стали 35 нормализованной – 405, улучшенной – 487; для стали 40 улучшенной – 525; для стали 45 нормализованной – 457,5, улучшенной – 562,5.

Кулачковые муфты используют в приводах с небольшой частотой вращения для передачи крутящих моментов от 4 до 400 Н·м.

Под действием максимального крутящего момента кулачки полумуфт смещаются относительно друг друга и выходят из зацепления (рис. 1.3).

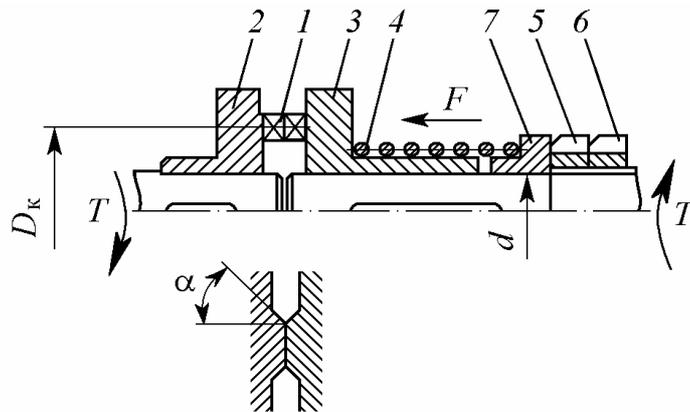


Рис. 1.3. Кулачковая предохранительная муфта:
1 – кулачки; 2, 3 – полумуфты; 4 – пружина;
5, 6 – гайка и контргайка; 7 – втулка

Расчет кулачковой муфты заключается в правильном конструктивном определении ее размеров с целью выполнения условия выключения муфты при предельной нагрузке, а также в определении силы предварительного сжатия пружины муфты и силы сжа-

тия пружины при срабатывании муфты с последующим расчетом и подбором пружины необходимых размеров и жесткости.

Условие выключения муфты выполняется, если

$$k_d [\operatorname{tg}(\alpha - \beta) - D_k \cdot f / d] \geq \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.11)$$

где $k_d = 1 \dots 6$ – коэффициент динамичности привода, принимаемый по приложению 2; $\alpha = 45 \dots 60^\circ$ – угол наклона боковой поверхности кулачка; $\beta = 2 \dots 8^\circ$ – угол трения боковой поверхности кулачка; D_k – диаметр окружности точек приложения окружного усилия к кулачкам, м; $f = 0,1 \dots 0,15$ – коэффициент трения в шлицевом или шпоночном соединении: при сухом трении чугуна по чугуну или закаленной стали $f = 0,15$; при наличии смазки для этих пар трения $f = 0,08$; для пары закаленная сталь – закаленная сталь при наличии смазки $f = 0,06$; d – диаметр вала, м.

Сила сжатия F пружины 4, определяющая момент срабатывания муфты, создается предварительной деформацией пружины гайкой 5, которая фиксируется в отрегулированном положении гайкой 6. Сидящая на шпонке втулка 7 не позволяет пружине закручиваться при ее сжатии гайкой 5.

Сила предварительного сжатия пружины муфты F , Н, определяется по формуле

$$F = 2T / D_k [\operatorname{tg}(\alpha - \beta) - D_k \cdot f / d], \quad (1.12)$$

где T – номинальный крутящий момент, передаваемый муфтой, Н·м.

Сила сжатия пружины при срабатывании муфты под действием предельной нагрузки F_c , Н, определяется из выражения

$$F_c = 2T_p / D_k [\operatorname{tg}(\alpha - \beta) - D_k \cdot f / d], \quad (1.13)$$

где T_p – расчетный момент срабатывания муфты, $T_p = k_d \cdot F$, Н·м.

Следовательно

$$F_c = k_d \cdot F. \quad (1.14)$$

Пружины сжатия навивают с просветом между витками. Зазор между витками во избежание их соприкосновения при сжатии пружины $\delta \approx 0,1d$, мм, где d – диаметр проволоки, из которой свита пружина, мм.

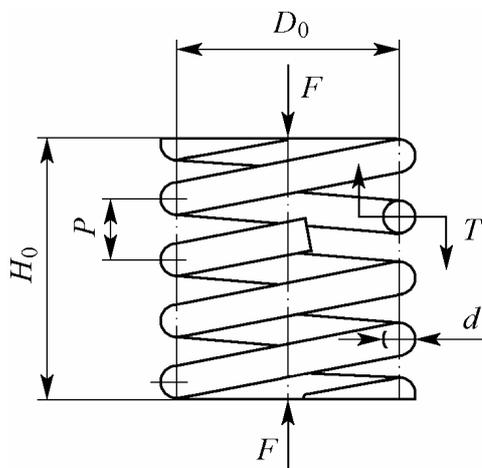


Рис. 1.4. Пружина сжатия с поджатыми и сошлифованными крайними витками

Шаг пружины $P \approx 1,1d$, мм.

Для образования опорной поверхности, перпендикулярной к продольной оси пружины, крайние витки поджимают и сошлифовывают (рис. 1.4).

В сечении витка пружины действует крутящий момент $T = F_c D_0 / 2$, Н·м. Поэтому винтовые пружины рассчитывают на кручение.

Диаметр проволоки, из которой свита пружина, d , мм, определяют по формуле

$$d = 1,6 \sqrt{k F_c C / [\tau]}, \quad (1.15)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий влияние кривизны витков и поперечной силы, принимаемый по прил. 5; C – индекс пружины: $C = D_0 / d$, где D_0 – средний диаметр витков пружины, мм; $[\tau]$ – допускаемое напряжение, МПа, принимаемое по прил. 4.

Выбирая индекс пружины, следует придерживаться следующих рекомендаций: при диаметрах d , мм, до 2,5; 3...5; 6...12 C соответственно равен 5...12; 4...10; 4...9.

После расчета диаметра пружинной проволоки по формуле (1.15) окончательное значение принимают по ГОСТ 9389-75.

Условие прочности для пружины из проволоки принятого диаметра имеет вид:

$$\tau_{\max} = 8k F_c C / (\pi d^2) \leq [\tau]. \quad (1.16)$$

Изменение высоты винтовой пружины сжатия из проволоки круглого сечения λ_p , мм, определяется по формуле

$$\lambda_p = 8 F_c C^3 n / (G d), \quad (1.17)$$

где n – число рабочих витков пружины; у пружин сжатия рабочее число витков на 1,5...2 меньше полного числа витков из-за того, что крайние витки поджимают и сошлифовывают, и они в деформации не участвуют; G – модуль сдвига (для стали $G = 8 \cdot 10^4$ МПа).

Порядок расчета муфты со срезными штифтами.

1. Задать крутящий момент, передаваемый муфтой.
2. По формуле (1.10) определить расчетный момент, передаваемый муфтой.
3. Принять материал штифтов и их количество.
4. Вычертить эскиз муфты и обозначить диаметр окружности среза штифтов.
5. По формуле (1.9) рассчитать диаметр срезных штифтов с учетом их количества.

Порядок расчета кулачковой муфты.

1. Задать крутящий момент, передаваемый муфтой.
2. По прил. 2 установить коэффициент динамической нагрузки для данного типа привода.
3. Вычертить эскиз муфты с обозначением принятых конструктивных размеров.
4. По формуле (1.11) проверить выполнение условия выключения муфты при принятых конструктивных размерах.
5. При невыполнении условия выключения муфты изменить конструктивные размеры муфты и повторить расчет по формуле (1.11).
6. По формуле (1.12) определить силу предварительного сжатия пружины муфты.
7. По формуле (1.14) определить силу сжатия пружины при срабатывании муфты.
8. По прил. 3 установить класс цилиндрической пружины.
9. По силе, вызывающей максимальную деформацию пружины (сила сжатия пружины при срабатывании муфты), по прил. 4 установить предварительно диаметр пружинной проволоки.
10. Вычертить эскиз пружины с указанием конструктивных размеров.
11. Принять индекс пружины.
12. По формуле (1.15) определить диаметр пружинной проволоки и принять окончательное значение по ГОСТ 9389-75.
13. Уточнить значение индекса пружины с учетом принятого диаметра пружинной проволоки.
14. По формуле (1.16) проверить пружину на прочность.
15. По формуле (1.17) определить изменение высоты пружины под действием силы сжатия при срабатывании муфты.

1.5. Методика расчета шпоночных соединений

Шпоночное соединение вала с установленной на нем деталью препятствует их относительному повороту и предназначено для передачи крутящего момента.

Размеры сечений шпонки и пазов выбирают в зависимости от диаметра вала, длина шпонки выбирается исходя из длины ступицы (несколько меньше ее).

Шпонки изготавливаются из стали 45, 50. Призматические шпонки (рис. 1.5) изготавливают из чистотянутой стали прямоугольного сечения с отношением высоты к ширине от 1 : 1 до 1 : 2. Узкие грани шпонки – рабочие.

Размеры сечений призматических шпонок и пазов приведены в прил. 6.

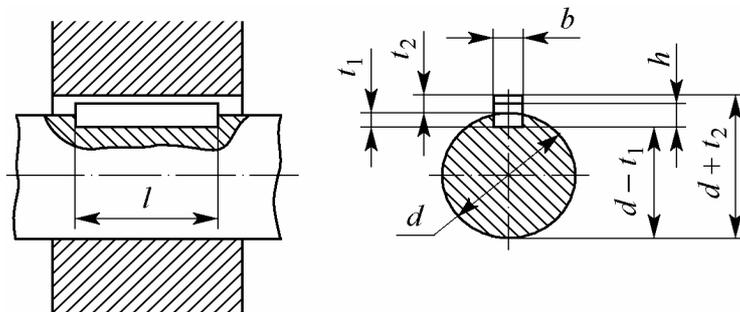


Рис. 1.5. Соединение с призматической шпонкой

Сегментные шпонки (рис. 1.6) применяют при валах небольших диаметров (до 38 мм). Эти соединения просты в изготовлении и сборке, однако вал ослабляется глубоким пазом под шпонку.

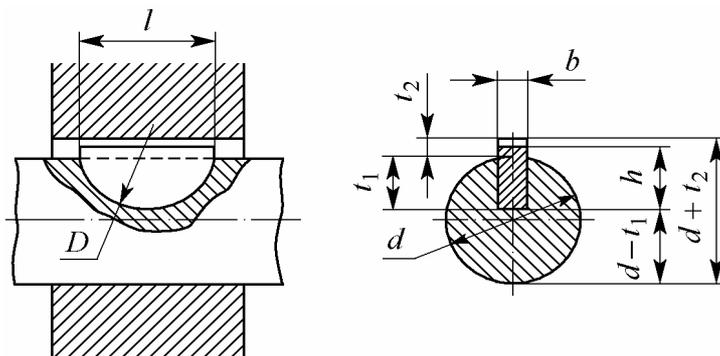


Рис. 1.6. Соединение с сегментной шпонкой

Призматические и сегментные шпонки рассчитываются на смятие боковых граней, выступающих из вала, и на срез.

Условие прочности на смятие:

$$[T_{\max}] = 0,5d l_p(h - t_1) [\sigma_{\text{см}}], \quad (1.18)$$

где T_{\max} – наибольший допускаемый крутящий момент, передаваемый шпоночным соединением, Н·м; d – диаметр вала, мм; l_p – рабочая длина шпонки: для призматических шпонок с плоскими торцами $l_p = l$, со скругленными – $l_p = l - b$, где l – полная длина шпонки; l, b, h, t_1 – см. прил. 6, 7; $[\sigma_{\text{см}}]$ – допускаемое напряжение при смятии, принимается 200...400 МПа.

Условие прочности на срез:

$$[T_{\max}] = 0,5(d + h - t_1) b l [\tau_{\text{ср}}], \quad (1.19)$$

где для сегментной шпонки $l = 0,95D$, мм (прил. 7); $\tau_{\text{ср}}$ – предел прочности материала шпонки на срез, МПа.

Порядок расчета.

1. Задать величину крутящего момента, передаваемого шпоночным соединением.
2. Выбрать вид шпоночного соединения с учетом диаметра вала и передаваемого крутящего момента.
3. По прил. 6, 7 определить размеры шпоночного соединения и вычертить эскиз соединения с указанием конструктивных размеров.
4. Выбрать материал шпонки и по формулам (1.18), (1.19) определить максимальный крутящий момент, передаваемый шпоночным соединением.
5. Сравнить величину максимального крутящего момента, передаваемого шпоночным соединением, с заданным. Максимальный крутящий момент, передаваемый шпоночным соединением, не должен превышать заданный более чем на 10...25%.

2. РАСЧЕТ СОСУДОВ И АППАРАТОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

2.1. Методика расчета сосудов и аппаратов, работающих под давлением

На предприятиях различных отраслей промышленности широко используются сосуды и аппараты, коммуникации, работающие под повышенным давлением.

Сосудами называются герметически закрытые емкости, предназначенные для ведения химических, тепловых и других технологических процессов, а также для хранения и транспортировки газообразных, жидких и других веществ.

Особую опасность представляют собой сосуды, находящиеся под избыточным давлением, так как в процессе их взрыва при химическом или физическом превращении вещества выделяется огромное количество энергии. Например, при физическом взрыве, т. е. при внезапном адиабатическом расширении газов или паров, энергия сжатой среды в течение короткого промежутка времени (0,1 с) реализуется в кинетическую энергию осколков разрушенного сосуда и ударную волну мощностью A , Вт:

$$A = W / t, \quad (2.1)$$

где W – работа взрыва при адиабатическом расширении газа, Дж;
 t – время действия взрыва, с (порядка 0,1 с).

В свою очередь работа взрыва сосуда может быть определена по формуле

$$W = VP_1 / (m - 1) [1 - (P_2 / P_1)^{m-1/m}], \quad (2.2)$$

где V – объем сосуда (начальный объем газа), м³; P_1 , P_2 – начальное и конечное давления газа в сосуде, Па; m – показатель адиабаты (например, для воздуха $m = 1,41$).

$$m = C_P / C_V, \quad (2.3)$$

где C_P – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); C_V – то же при постоянном объеме.

При взрывах сосудов под давлением развиваются большие мощности, которые могут приводить к значительным разрушениям. Так, мощность, выделяющаяся при взрыве сосуда емкостью

1 м³, содержащего воздух под давлением 1,2 МПа (12 кгс/см²), при длительности взрыва 0,1 с составляет 28 МВт.

При взрыве парового котла давление резко снижается до атмосферного, и находящаяся в нем вода мгновенно испаряется. Объем, занимаемый этим паром, будет примерно в 700 раз больше объема испарившейся воды.

Особенно опасны взрывы сосудов, содержащих горючую среду, так как осколки резервуаров даже большой массы (до нескольких тонн) разлетаются на расстояние до нескольких сот метров и при падении на здания, технологическое оборудование, емкости вызывают разрушения, новые очаги пожаров, гибель людей.

В связи с особой опасностью такого оборудования их изготовление и эксплуатация регламентируются «Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

Эти Правила распространяются на следующие аппараты, сосуды и емкости, наиболее опасные по возможным последствиям взрывов:

а) сосуды, работающие под давлением воды с температурой выше 115°С или другой жидкости с температурой, превышающей температуру кипения, при давлении 0,07 МПа, без учета гидростатического давления;

б) сосуды, работающие под давлением пара или газа свыше 0,07 МПа;

в) баллоны, предназначенные для транспортирования и хранения сжатых, сжиженных и растворенных газов под давлением свыше 0,07 МПа;

г) цистерны и бочки для транспортирования и хранения сжатых и сжиженных газов, давление паров которых при температуре до 50°С превышает давление 0,07 МПа;

д) цистерны и сосуды для транспортирования и хранения сжатых, сжиженных газов, жидкостей и сыпучих тел, в которых давление выше 0,07 МПа создается периодически для их опорожнения;

е) барокамеры.

Материалы, используемые для изготовления сосудов под давлением, должны обеспечивать их надежную работу в течение расчетного срока службы с учетом заданных условий эксплуатации (расчетные температура, давление, состав и характер среды и др.). Они выбираются в соответствии с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

Номинальную толщину стенки обечайки рассчитывают по одной из следующих формул:

– при номинальном наружном диаметре:

$$S = \frac{pD_n}{2,04\varphi\sigma_d + p} + C; \quad (2.4)$$

– при номинальном внутреннем диаметре:

$$S = \frac{pD_b}{2,04\varphi\sigma_d - p} + C, \quad (2.5)$$

где S – толщина стенки, мм; p – расчетное давление внутри сосуда, МПа; D_n , D_b – номинальные наружный и внутренний диаметры обечайки, мм; φ – коэффициент прочности сварного шва: для углеродистой, низколегированной, марганцовистой, хромомолибденовой и аустенитной стали $\varphi = 1$; для хромомолибденованадиевой и высокохромистой стали $\varphi = 0,8$; для углеродистой и низколегированной марганцовистой стали – в зависимости от способа сварки: при автоматической двусторонней сварке под флюсом, контактной сварке, односторонней ручной и автоматической сварке под флюсом, электрошлаковой сварке, ручной сварке в атмосфере углекислого газа и аргонодуговой сварке $\varphi = 0,85$, при всех других видах ручной электрической и газовой сварки $\varphi = 0,8$; σ_d – нормальное допускаемое напряжение, МПа (табл. 2.1); C – прибавка к расчетной толщине стенки, мм: для обечаек, свариваемых из листа или кованных с последующей механической обработкой при толщине листа не более 20 мм $C = 1$; при толщине листа более 20 мм $C = 0$; если наибольший минусовой допуск по толщине листа превышает 3% номинальной толщины, то в прибавке C должно быть учтено это превышение.

Расчетные формулы пригодны при соблюдении следующих условий:

– для емкостей, содержащих воду, пароводяную смесь или насыщенный пар,

$$\frac{S - C}{D_n} \leq 0,18, \text{ или } \frac{S - C}{D_b} \leq 0,28; \quad (2.6)$$

– для сосудов, содержащих перегретый пар,

$$\frac{S - C}{D_n} \leq 0,28, \text{ или } \frac{S - C}{D_b} \leq 0,64. \quad (2.7)$$

Таблица 2.1

Нормальные допускаемые напряжения стали в зависимости от температуры стенки емкости

Расчетная температура стенки, °С	Значение σ_d для сталей, МПа							
	10	20, 20К	25	15ГС	12МХ	15ХМ	12Х1МФ	15Х1М1Ф
20	127,4	144,1	161,7	181,3	144,1	19,9	169,5	188,2
250	109,8	129,4	144,1	161,7	142,1	149	162,7	182,3
300	98	116,6	129,4	149,9	138,2	144,1	155,8	176,4
350	85,8	103,9	113,7	131,3	134,3	139,2	149	168,6
400	75,5	90,2	98	110,7	122,5	134,3	142,1	158,8
450	51,9	62,7	66,6	81,3	94,1	128,4	135,2	149
500	29,4	33,3	33,3	–	33,3	100,9	123,5	137,2
550	–	–	–	–	–	49	72,5	83,3

Окончание табл. 2.1

Расчетная температура стенки, °С	Значение σ_d для сталей, МПа				
	12Х2МФБ	12Х2МФСР	Х18Н10Т, Х14Н14В2М	Х14Н18В2БР, Х16Н16В2МБР	1Х12В2МФ
20	137,2	163,7	13,1	–	–
250	126,4	156,8	122,5	–	–
300	124,5	150	117,6	–	–
350	120,5	144,1	113,7	–	–
400	117,6	137,2	108,8	–	–
450	114,7	130,3	104,9	–	–
500	78,4	119,6	101,9	–	–
550	50	72,5	99	112,7	–
600	–	–	72,5	100,9	60,8
650	–	–	47	78,4	25,5
700	–	–	29,4	45,1	–

Порядок расчета.

1. Подбирают по табл. 2.1 материал для изготовления сосуда под давлением в зависимости от особенностей технологического процесса.
2. Рассчитывают по формуле (2.4) или (2.5) толщину обечайки.
3. Проверяют условия пригодности расчетной формулы для определения толщины стенки.

2.2. Методика расчета предохранительных клапанов

Предохранительные клапаны предназначены для обеспечения безопасной эксплуатации установок и предотвращения аварий. Применяются на резервуарах, котлах, емкостях, сосудах или трубопроводах для автоматического выпуска (сброса) жидких, газообразных сред и пара из системы высокого давления (при превышении давления в ней свыше допустимого) в атмосферу или в систему низкого давления.

При повышении давления рабочей среды сверх установленного золотник клапана поднимается, открывая проходное сечение, и происходит сброс среды.

При снижении давления в аппарате до давления обратной посадки (давления закрытия) золотник опускается на седло, и сброс среды прекращается. Затем давление до клапана восстанавливается до рабочего (давления настройки)

На рис. 2.1 представлено устройство наиболее широко используемых рычажно-грузовых и пружинных предохранительных клапанов.

В пружинных клапанах золотник прижимается к седлу пружиной.

Усилие сжатия пружины на требуемое давление регулируется винтом.

Пружинные клапаны изготавливают малоподъемными и полноподъемными.

В рычажно-грузовых клапанах золотник прижимается к седлу рычагом через шарнирно соединенный с ним шток.

На рычаге стопорными винтами закреплены грузы, масса и место расположения которых на рычаге зависят от рабочего давления (давления настройки). Превышение давления рабочей среды вызывает подъем золотника и сброс среды.

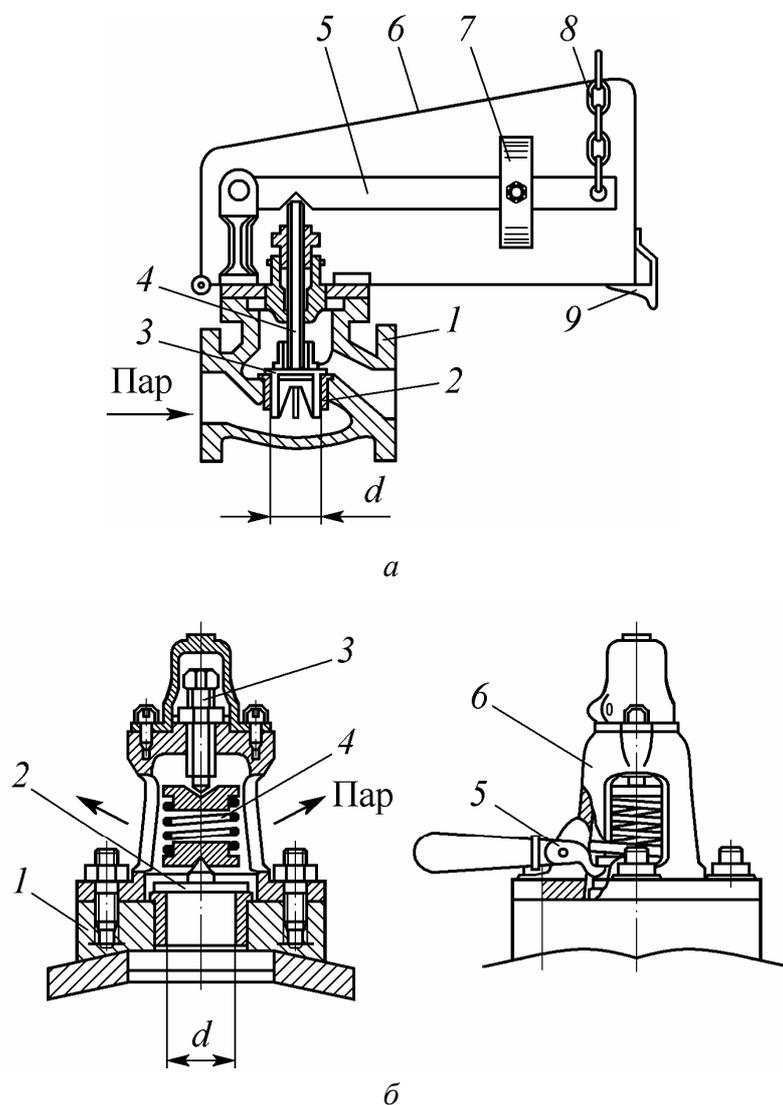


Рис. 2.1. Предохранительные клапаны:
 а – рычажный: 1 – корпус; 2 – седло; 3 – тарелка; 4 – шток; 5 – рычаг;
 б – кожух; 7 – груз; 8 – цепочка; 9 – запорное устройство;
 б – пружинный: 1 – корпус; 2 – тарелка; 3 – стопорный винт; 4 – пружина;
 5 – рукоятка; 6 – кожух

Значение отношения высоты подъема клапана к внутреннему диаметру тарелки клапана определяет его тип:

$$H = h/d, \quad (2.8)$$

где h – высота подъема клапана, см; d – внутренний диаметр тарелки клапана, см: $2,5 \leq d \leq 12,5$.

При $H \leq 0,05$ клапан считают малоподъемным, при $0,05 \leq H \leq 0,25$ – полноподъемным.

Рычажно-грузовые клапаны изготавливают только малоподъемными: однорычажные клапаны – с одним седлом и двухрычажные – с двумя седлами. Эти клапаны – простой конструкции; отличаются постоянством усилия; могут быть использованы только в стационарных установках; не могут быть использованы для работы с противодавлением.

Малоподъемные клапаны – пропорционального действия; характеризуются тем, что открытие клапана (подъем золотника) происходит равномерно, при превышении давления в системе над давлением начала открытия. При подъеме золотника равномерно увеличивается пропускная способность клапана. Малоподъемные клапаны используются, как правило, на несжимаемых средах. Применению их на сжимаемых средах препятствует невысокое значение пропускной способности.

К преимуществам малоподъемных клапанов перед полноподъемными относятся: пропорциональность характеристики и способность открываться так, чтобы был обеспечен фактический аварийный расход; возможность их использования для жидких и газообразных сред.

Пружинные клапаны – более совершенной конструкции, чем рычажно-грузовые; имеют меньшую инерционность, меньшую массу и габаритные размеры; преимущественно полноподъемные.

Полноподъемные клапаны характеризуются быстротой срабатывания на полный ход золотника. Они обеспечивают высокие значения пропускной способности при сравнительно малых превышениях давления в защищаемой системе. Время открытия этих клапанов – 0,008–0,04 с.

Пропускную способность предохранительных клапанов и их число следует выбирать так, чтобы в защищаемой системе не создавалось давление, превышающее избыточное рабочее давление более чем на 0,05 МПа при избыточном рабочем давлении в системе до 0,3 МПа включительно; на 15% – при избыточном рабочем давлении в системе до 6 МПа включительно и на 10% – при избыточном рабочем давлении свыше 6 МПа.

Предохранительные устройства должны устанавливаться на патрубках или трубопроводах, непосредственно присоединенных к сосуду, и в местах, доступных для их обслуживания.

Установка запорной арматуры между сосудом и предохранительным устройством, а также за ним не допускается.

В табл. 2.2 приведены марки и характеристики наиболее употребительных предохранительных клапанов.

Таблица 2.2

Предохранительные клапаны

Наименование и краткая характеристика (давление приводится в МПа, а диаметр – в мм)	Условное обозначение	Рабочая среда	Температура рабочей среды, °С
1	2	3	4
Малоподъемный пружинный цапковый, латунный на P_y 0,6 МПа; D_y 20 мм	КВ 71-1-11-001	Воздух и пар	До 250
Малоподъемный пружинный латунный, на P_y 2,5 МПа; D_y 20 мм	17Б2бк	Вода и пар	До 180
Малоподъемный рычажно-грузовой фланцевый, чугунный, на P_y 1,6 МПа; D_y 25 и 40 мм	17ч3бр1 (исп. 2)	Вода, пар и другие жидкие и газообразные неагрессивные среды	От –15 до +225
То же, на P_y 1,6 МПа; D_y 50, 80 и 100 мм	17ч18бр	То же	До 225
Малоподъемный двухрычажный фланцевый, чугунный, на P_y 1,6 МПа; D_y 80, 125 и 150 мм	17ч19бр	– « –	До 225
Малоподъемный пружинный цапковый, стальной, на P_y 1,6 МПа; D_y 15 и 25 мм	17с11нж	Аммиак, хладон и другие жидкие и газообразные среды	От –40 до +150 (D_y 15 мм) и от –40 до +225 (D_y 25 мм)
Малоподъемный пружинный фланцевый, стальной, на P_y 1,6 МПа; D_y 50 мм	17с12нж	То же	От –40 до +225
Полноподъемный пружинный фланцевый, стальной, на P_y 1,6 МПа; D_y 50 и 80 мм	17с22нж	Жидкие и газообразные неагрессивные среды	До 400
Малоподъемный пружинный фланцевый, стальной, на P_y 4 МПа; D_y 50 и 80 мм	17с24нж	Пар и другие жидкие и газообразные неагрессивные среды	До 400
Полноподъемный пружинный цапковый, стальной, на P_y 0,8 МПа; D_y 25 мм	17с42нж	Пар и другие неагрессивные газообразные среды	До 200

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 1,6 МПа; D_y 50, 80, 100, 150 и 200 мм	СППК4-16 (17с13нж)	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450
То же из коррозионностойких сталей	СППК4-16 (17нж13ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4-16 (17нж32ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 1,6 МПа; D_y 50, 80, 100, 150 и 200 мм	СППК4Р-16 (17с17нж)	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450
То же из коррозионностойких сталей	СППК4Р-16 (17нж17ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4Р-16 (17нж92ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 4 МПа; D_y 50, 80, 100 и 150 мм	СППК4-40 (17с14нж)	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450
	СППК4-40 (17нж14ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4-40 (17нж94ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 4 МПа; D_y 50, 80, 100 и 150 мм	СППК4Р-40 (17с25нж)	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450
	СППК4Р-40 (17нж25ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4Р-40 (17нж93ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 6,3 МПа; D_y 50, 80 и 100 мм	СППК4-64 (17с85нж)	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450

1	2	3	4
То же из коррозионностойких сталей	СППК4-64 (17нж85ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4-64 (17нж86ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 6,3 МПа; D_y 50, 80 и 100 мм	СППК4Р-64 (17с89нж)	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450
То же из коррозионностойких сталей	СППК4Р-64 (17нж89ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4-64 (17нж79ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Полноподъемный пружинный муфтовый стальной на P_y 10 МПа; D_y 25 мм	СППКМ-100	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 16 МПа; D_y 50 и 80 мм	СППК4-160 (17с80нж)	То же	До 450
То же из коррозионностойких сталей	СППК4-160 (17нж80ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4-160 (17нж87ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Полноподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 16 МПа; D_y 50 и 80 мм	СППК4Р-160 (17с90нж)	Жидкие и газообразные неагрессивные химические и нефтяные среды	До 450
То же из коррозионностойких сталей	СППК4-160 (17нж90ст)	Жидкие и газообразные агрессивные химические и нефтяные среды	До 600
	СППК4-160 (17нж82ст)	Жидкие и газообразные высокоагрессивные химические и нефтяные среды	До 200
Малоподъемный пружинный фланцевый стальной на P_y 32 МПа; D_y 10, 25 и 32 мм	17с52п	Жидкие и газообразные неагрессивные среды	От -30 до +120

Примечание. P_y – условное давление; D_y – условный диаметр.

Количество предохранительных клапанов рассчитывают по формуле

$$n = \frac{kG_k}{pdh}, \quad (2.9)$$

где k – коэффициент, для малоподъемных клапанов равный 0,0075, для полноподъемных – 0,015; G_k – производительность котла по пару при максимальной нагрузке, кг/ч; p – абсолютное давление пара в котле, Па.

На котлах паропроизводительностью, меньшей или равной 100 кг/ч, допускается установка одного предохранительного клапана, при паропроизводительности котла более 100 кг/ч – не менее двух предохранительных клапанов.

Пропускная способность клапана – количество рабочей среды в массовых G , кг/ч, или объемных Q , м³/ч, единицах, сбрасываемое через клапан при установленных значениях давления на входе и выходе (противодавление), конкретных значениях температуры рабочей среды на входе в клапан и определенном ходе золотника.

Пропускную способность предохранительных клапанов для газов и паров, кг/ч, рассчитывают по формуле

$$G = 216pa\sqrt{M/T}, \quad (2.10)$$

где p – давление под клапаном, Па (максимальное давление под клапаном должно быть не более 1,1 расчетного); a – площадь сечения клапана, см²; M – молекулярная масса газов или паров: для воздуха $M = 29$ кг/кмоль, для водяного пара $M = 18$ кг/кмоль; T – абсолютное значение температуры пара или воды в котле, К.

Выпускное сечение предохранительных клапанов должно быть таким, чтобы выпускать весь избыточный пар или газ, вырабатываемый установкой в течение 1 ч, без заметного повышения предельного давления.

Порядок расчета.

1. По табл. 2.2 выбрать тип предохранительного клапана в зависимости от технологических требований, расчетного давления, температуры и характеристики среды.

2. Из соотношения (2.8) определить высоту подъема клапана.

3. По формуле (2.9) рассчитать количество предохранительных клапанов.

4. Определить пропускную способность клапана с учетом запаса в зависимости от избыточного рабочего давления.

Более точный расчет предохранительных клапанов на различную рабочую среду можно провести по [8].

2.3. Методика расчета предохранительных мембран

Предохранительные мембраны предназначены для защиты различных аппаратов от разрушения в случае превышения рабочего давления жидких или газообразных сред. При достижении критического давления мембраны разрушаются, обеспечивая сброс давления в аппарате. По сравнению с предохранительными клапанами мембраны имеют ряд преимуществ: в них нет подвижных частей, они обеспечивают более надежную герметичность при нормальной работе аппарата и имеют меньшую инерционность при срабатывании.

Мембранные предохранительные устройства устанавливаются в следующих случаях:

– вместо рычажно-грузовых и пружинных предохранительных клапанов, когда эти клапаны в рабочих условиях конкретной среды не могут быть использованы вследствие их инерционности или других причин;

– перед предохранительными клапанами в случаях, когда они не могут надежно работать вследствие вредного воздействия рабочей среды (коррозия, эрозия, полимеризация, кристаллизация, прикипание, примерзание) или возможных утечек через закрытый клапан взрыво- и пожароопасных, токсичных, экологически вредных веществ;

– параллельно с предохранительными клапанами для увеличения пропускной способности систем сброса давления;

– на выходной стороне предохранительных клапанов для предотвращения вредного воздействия рабочих сред со стороны сбросной системы и для исключения влияния колебаний противодавлений со стороны этой системы на точность срабатывания предохранительных клапанов.

К основным типам предохранительных мембран относятся разрывные, хлопающие, ломающиеся, срезные, отрывные и специальные.

Наибольшее применение получили разрывные предохранительные мембраны.

Важным рабочим параметром предохранительных мембран является коэффициент, характеризующий отношение разрушающего давления $p_{\text{разр}}$ к рабочему $p_{\text{раб}}$:

$$k = p_{\text{разр}} / p_{\text{раб}} \cdot \quad (2.11)$$

Обычно значения этого коэффициента лежат в пределах от 1,2 до 1,3.

Разрывные мембраны изготовляют из тонколистовых материалов с учетом свойств и температуры рабочих сред. После установки разрывной мембраны в держателях ей придают сферическую форму, нагружая давлением выпучивания $p_{\text{в}}$. Предварительное выпучивание способствует уменьшению разницы между разрушающими давлениями при статическом и динамическом нагружениях. Исследования показывают: чем меньше разность ($p_{\text{разр}} - p_{\text{раб}}$), тем выше скорость срабатывания мембран, поэтому для формообразования разрывных мембран желательно применять максимальные значения $p_{\text{в}}$. Однако в условиях пульсирующего давления с увеличением $p_{\text{в}}$ уменьшается число циклов нагружения, которое может выдержать мембрана.

Материалы разрывных предохранительных мембран приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Материалы разрывных предохранительных мембран

Материал	Марка	ГОСТ	Максимальная рабочая температура, °С	Рабочие среды
1	2	3	4	5
Фольга алюминиевая	АД1, АД0, А99, А97, А95, А7, А6, А5, А0	618-97	100	Растворы перекиси водорода, уксусная кислота, глицерин, концентрированная азотная кислота, жидкий метан
Лента алюминиевая	А7, А6, А5, А0, АД00, АД, АД0, АД1, АМц	13726-97	100	То же
Фольга медная	М1, М1р, М2, М2р, М3, М3р	5638-75	160	Жидкий кислород

1	2	3	4	5
Лента никелевая	НП1, НП2, НП3, НП4, НК0,2	5187-70	400	Окислительные среды, щелочи
Листы из титана и его сплавов	BT1-00, BT1-0, OT4-0, OT4-1, OT	22178-76	300	Азотная кислота, влажный хлор, уксусная и муравьиная кислоты, растворы соляной и серной кислоты
Тонколистовая коррозионно- и жаростойкая сталь	08X18H10T	19904-90	300	Азотная кислота и ее соли, фосфорная кислота, большинство органических продуктов
Листы свинцовые	C0, C1, C2, C3	9559-89	70	Коррозионные среды

Варианты устройства предохранительных мембран изображены на рис. 2.2.

Исходными данными для проектирования мембран являются разрушающее давление $p_{\text{разр}}$ и условный проход D_y , определяемый с учетом требуемой пропускной способности предохранительного устройства. При известном рабочем давлении $p_{\text{разр}}$ можно найти, пользуясь зависимостью (2.11).

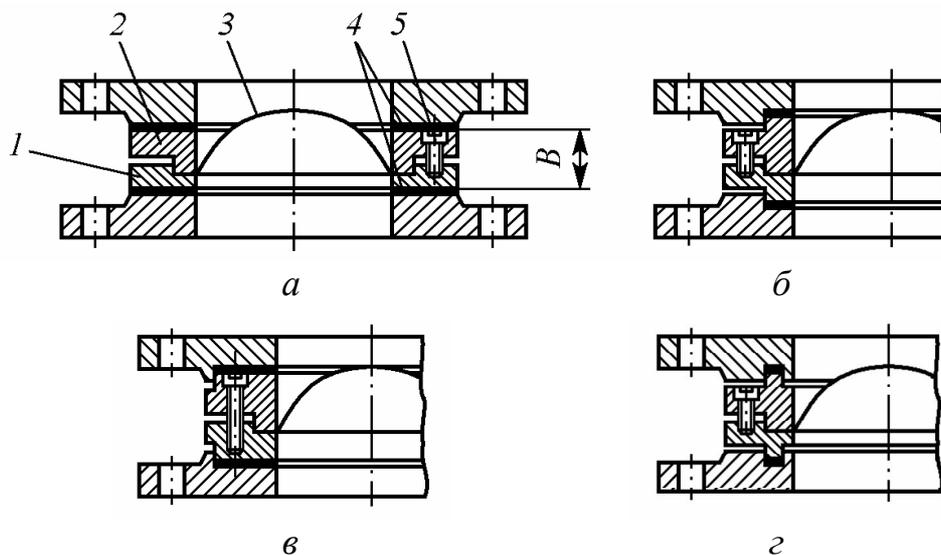


Рис. 2.2. Предохранительные мембраны:
а, б, в, г – варианты конструктивного исполнения элементов держателей;
1, 2 – прижимные кольца; *3* – мембрана; *4* – прокладка; *5* – винт

Толщину мембраны рассчитывают ориентировочно по формуле

$$s = p_{\text{разр}} D_y / (k_p \sigma_{\text{пч}}), \quad (2.12)$$

где k_p – коэффициент, принимаемый в пределах от 3,3 до 4,2; $\sigma_{\text{пч}}$ – предел прочности тонколистового материала.

Точность срабатывания разрывных мембран можно повысить за счет увеличения их толщины. Чтобы сохранить при этом значение $p_{\text{разр}}$ в заданных пределах, необходимо увеличить условный проход D_y до значений, определяемых зависимостью (2.12).

Предохранительные мембраны должны быть маркированы, при этом маркировка не должна оказывать влияние на точность их срабатывания. В маркировке указывается наименование (обозначение) или товарный знак изготовителя, номер партии мембран, тип, условный и рабочий диаметры, материал, минимальное и максимальное давление срабатывания мембран при заданной температуре и при температуре 20°C.

Порядок расчета.

1. В зависимости от требований технологического процесса определить из соотношения (2.11) величину разрушающего давления.

2. Выбрать из табл. 2.3 материал для предохранительной мембраны.

3. Определить значение условного прохода с учетом требуемой пропускной способности предохранительного устройства.

4. По формуле (2.12) рассчитать толщину мембраны.

2.4. Методика расчета теплоизоляции

Многое производственное оборудование (колонны, котлы, паропроводы, бойлеры, сушилки, автоклавы, теплообменники и т. п.) являются источниками теплового излучения. Нагретые поверхности такого оборудования представляют опасность для обслуживающего персонала, так как могут вызвать термические ожоги. Для предотвращения травмирования работающих, а также с целью энергосбережения необходимо предусматривать теплоизоляцию поверхностей, находящихся в пределах рабочей зоны и имеющих высокую (более 45°C) температуру.

При определении толщины изоляции наряду с температурными характеристиками учитывают форму изолируемой поверхности и ее размер. Толщину изоляции при заданной температуре на ее наружной поверхности определяют по следующим формулам:

– для плоских поверхностей и цилиндрических поверхностей диаметром 2 м и более, а также сосудов, у которых отношение наружного диаметра к внутреннему менее двух,

$$\delta_{\text{из}} = \frac{\lambda_{\text{из}}(T_{\text{т}} - T_{\text{п}})}{\alpha_{\text{н}}(T_{\text{п}} - T_{\text{о}})}; \quad (2.13)$$

– для поверхностей цилиндрических сосудов с диаметром основания менее 2 м

$$\frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{н}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{н}}} = \frac{2\lambda_{\text{из}}(T_{\text{т}} - T_{\text{п}})}{\alpha_{\text{н}}d_{\text{н}}(T_{\text{п}} - T_{\text{о}})}; \quad \delta_{\text{из}} = \frac{d_{\text{н}}}{2} \left(\frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{н}}} - 1 \right), \quad (2.14)$$

где $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К), определяемый по средней температуре слоя в зависимости от вида изолирующего материала (табл. 2.4),

$$T_{\text{ср}} = 0,5(T_{\text{т}} + T_{\text{п}}); \quad (2.15)$$

$T_{\text{т}}$ – температура теплоносителя, К; $T_{\text{п}}$ – температура наружной поверхности изоляции, К ($T_{\text{п}}$ не должна превышать 318 К); $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности к окружающей среде, Вт/(м²·К): для плоских поверхностей

$$\alpha_{\text{н}} = 8,4 + 0,06(T_{\text{п}} - T_{\text{о}}); \quad (2.16)$$

для цилиндрических –

$$\alpha_{\text{н}} = 8,1 + 0,45(T_{\text{п}} - T_{\text{о}}); \quad (2.17)$$

$T_{\text{о}}$ – температура окружающей среды (воздуха в помещении), К; $d_{\text{из}}$ – диаметр изолированной поверхности, м; $d_{\text{н}}$ – диаметр неизолированной поверхности, м.

В случае замены одного теплоизолирующего материала другим термические сопротивления обоих слоев, м²·К/Вт, должны быть одинаковыми: $R = R_1 = R_2$. Из этого условия определяют толщину слоя вновь наносимого теплоизолирующего материала:

$$\delta_{2\text{из}} = R\lambda_{\text{из}}. \quad (2.18)$$

Таблица 2.4

Формулы для расчета коэффициента теплопроводности

Наименование теплоизолирующего материала	Максимальная температура применения, °С	Расчетная формула для определения $\lambda_{изз}$, Вт / (м·К)
Асбестовая ткань в два слоя и более	723	$0,123 + 0,000\ 16T_{cp}$
Мастичный асбозурит	1173	$0,14 + 0,000\ 15T_{cp}$
Мастичный асботермит	673	$0,11 + 0,000\ 09T_{cp}$
Войлок:		
минеральный	373	$0,064 + 0,000\ 17T_{cp}$
строительный	373	$0,038 + 0,000\ 16T_{cp}$
Вулканитовые изделия	873	$0,078 + 0,000\ 16T_{cp}$
Пендиатомитовые изделия	1173	$0,093 + 0,000\ 16T_{cp}$
Минеральная вата в набивке под сетку по опорным кольцам из теплоизоляционного материала	873	$0,055 + 0,000\ 17T_{cp}$
Минераловатные маты	673	$0,51 + 0,000\ 17T_{cp}$
Мастичный ньювель	623	$0,076 + 0,000\ 06T_{cp}$
Пробка:		
минеральная	373	0,08
натуральная	373	0,06
Мастичный совелит	773	$0,085 + 0,000\ 09T_{cp}$
Стекловата	723	$0,047 + 0,000\ 31T_{cp}$
Теплоизоляционный шнур из минеральной ваты марки 250	423	$0,058 + 0,000\ 16T_{cp}$

Порядок расчета.

1. Подобрать теплоизолирующий материал из табл. 2.4.
2. Определить среднюю температуру слоя теплоизолирующего материала по формуле (2.15).
3. Рассчитать коэффициент теплопроводности слоев изоляции из выбранного материала (табл. 2.4) и коэффициент теплоотдачи по формулам (2.16) и (2.17).
4. Определить по формулам (2.13) и (2.14) толщину слоя теплоизолирующего материала.

3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

3.1. Общие положения

Безопасностью труда принято называть такое состояние условий труда, при котором отсутствует возможность воздействия на работающих опасных факторов. В электроустановках опасным фактором является электрический ток.

Основным условием устранения опасного воздействия электрического тока на организм человека, возможности возникновения пожаров является надежная изоляция токоподводящих проводов. Неправильный выбор марки и сечения проводов способствует возникновению аварийных ситуаций. Даже в нормальных условиях изоляция постепенно теряет свои первоначальные свойства, стареет. С течением времени развиваются местные дефекты, сопротивление изоляции начинает резко уменьшаться, а токи утечки непропорционально расти. В месте дефекта появляются частичные разряды тока. Изоляция выгорает. Происходит так называемый пробой изоляции, в результате чего возникает короткое замыкание, которое, в свою очередь, может привести к пожару или поражению людей током. Неправильный выбор сечения и марки проводов способствует быстрому развитию подобных явлений.

Чтобы исключить возникновение опасных ситуаций, провода электрических сетей должны выбираться с учетом возможных механических повреждений, увлажнения, химического воздействия, запыления, протекающего рабочего тока.

Под воздействием большого рабочего тока, на который изоляция проводов и электроустановок не рассчитана, возникает перегрев. Сопротивление изоляции начинает резко уменьшаться, что приводит к пробое изоляции и короткому замыканию. При этом мгновенно увеличивается ток во всех элементах электрической цепи и начинает выделяться большое количество тепла. Электропроводка не в состоянии отдать это тепло в окружающую среду, и, как следствие, происходит ее возгорание. Для предотвращения таких ситуаций необходимо, чтобы конструктивные параметры сетей (марка проводов и кабелей, их прокладка, сечение жил, класс изоляции машин и т. п.) соответствовали электрическим параметрам: току, напряжению, потребляемой мощности. Устройство электрических сетей регламентируется ПУЭ [13].

3.2. Методика расчета сечения проводов и их выбора в зависимости от окружающей среды

Для правильного выбора марки и сечения подводящих проводов необходимо знать вид нагрузки (активная, индуктивная), суммарную передаваемую электрическую мощность, характеристику помещений по условиям окружающей среды, тип проводки и способ ее прокладки.

Учитывая вид нагрузки и суммарную передаваемую мощность, определяют величину тока, протекающего в электрических проводах. По величине тока, марке провода, способу его прокладки, количеству жил определяют необходимое сечение провода.

Порядок расчета сечения провода.

1. Дать характеристику помещения по условиям окружающей среды (прил. 8).
2. Для пожароопасных и взрывоопасных помещений установить класс опасности по ПУЭ (прил. 9).
3. Определить суммарную активную нагрузку электрических потребителей.
4. Определить суммарный ток, протекающий по проводам:

$$G = P_{\text{общ}} \cdot 10^3 / U \cdot \cos\varphi,$$

где $P_{\text{общ}}$ – суммарная мощность потребителей электроэнергии, кВт; U – напряжение сети, В; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности активной нагрузки, принимается 1.

5. Выбрать тип проводки, марку провода и способ его прокладки (прил. 10).

6. По суммарному току, протекающему по проводам, и выбранной марке провода определить его необходимое сечение (прил. 11).

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

4.1. Общие положения

В настоящее время разработан ряд мероприятий, технических способов и средств защиты, позволяющих обеспечить высокий уровень электробезопасности на любой электроустановке. Все они описаны в «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ), «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭ) и «Правилах техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТБ).

К известным техническим способам и средствам обеспечения электробезопасности относятся: защитное заземление, зануление, выравнивание потенциалов, малое напряжение, электрическое разделение сетей, защитное отключение, изоляция токоведущих частей (рабочая, дополнительная, усиленная, двойная); компенсация токов замыкания на землю; оградительные устройства, предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности; средства защиты и предохранительные приспособления. В известной степени к защитным мерам можно отнести еще непрерывный контроль изоляции.

Ниже рассмотрены методы защиты с помощью устройств защитного заземления и зануления оборудования, а также даны методики и порядок расчета искусственных и естественных заземлителей и зануления.

Защитное заземление. Корпус электродвигателя или электрического аппарата, арматура электрического светильника или труба электропроводки в нормальных условиях не находятся под напряжением относительно земли, что достигается изоляцией от токоведущих частей. Однако при повреждении изоляции любая из этих частей может оказаться под напряжением, нередко равным фазному. Электродвигатель с пробитой на корпус изоляцией часто электрически соединен с машиной, которую он приводит в движение, например, установлен на станке. Рабочий, взявшийся за рукоятки управления станком, может попасть под напряжение. Чтобы уменьшить опасность поражения людей при повреждении изоляции токоведущих частей, принимают ряд мер. Наибольшее распространение получило защитное заземление, используемое в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В и в се-

тях с напряжением выше 1000 В (не зависимо от режима работы нейтрали источника питания). Под защитным заземлением понимают преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Это соединение должно иметь достаточно малое сопротивление, чтобы в случае замыкания на корпус прикосновение к нему человека не могло вызвать протекающие через его тело опасного для жизни тока.

Под замыканием на корпус (электрическое замыкание на корпус) понимают случайное электрическое соединение токоведущей части с металлическими нетоковедущими частями электроустановки. Замыкание на корпус может быть результатом случайного касания токоведущей части корпуса машины, повреждения изоляции, падения провода, находящегося под напряжением, на нетоковедущие металлические части и т. п.

Заземление состоит из зарытых в землю металлических электродов, называемых заземлителями, и проводников, соединяющих их с заземляемыми частями установок. Проводники, которые служат для соединения заземлителей одного с другим и с заземляемыми частями электроустановок, называют заземляющими. Совокупность заземлителей и заземляющих проводников называется заземляющим устройством. Для заземления электроустановок должны в первую очередь использоваться естественные заземлители.

В качестве последних могут быть использованы:

- а) проложенные под землей водопроводные и другие металлические трубы за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов, а также трубопроводов, покрытых изоляцией для защиты от коррозии;
- б) обсадные трубы, артезианские скважины;
- в) металлические конструкции и арматура железобетонных конструкций зданий и сооружений, имеющие соединение с землей;
- г) металлические шпунты гидротехнических сооружений;
- д) свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле.

Заземляющими проводниками могут служить нулевые проводники сети, металлические конструкции зданий и сооружений, стальные трубы электропроводок, алюминиевые оболочки кабелей, полосовая или круглая сталь и т. д.

И заземлители, и заземляющие проводники должны иметь как можно меньшие размеры и сечения, определяемые их проводимостью и термической устойчивостью.

Заземляемое оборудование присоединяют к магистрали заземления отдельными проводниками. Заземляющие проводники соединяют один с другим, а также с заземлителями и заземляемыми конструкциями, как правило, сваркой, а с корпусами аппаратов, машин и другого оборудования – сваркой и болтами.

Естественные заземлители должны быть подсоединены к заземляющим магистралям электроустановок не менее чем в двух местах. В случае невозможности использования естественных заземлителей необходимо сооружать искусственные, в качестве которых применяют:

а) полосы или круглую сталь, укладываемые горизонтально на дно котлована по периметру фундаментов, – углубленные заземлители;

б) стальные стержни диаметром 10–16 мм или угловую сталь со стенками толщиной не менее 4 мм – вертикальные заземлители; длина стержневых электродов должна быть 4,5–5 м, электродов из угловой стали – 2,5–3 м; верхний конец вертикального заземлителя должен быть заглублен на 0,6–0,7 м от поверхности земли;

в) полосовую сталь – горизонтальные заземлители, которые служат для соединения вертикальных заземлителей или несут самостоятельную функцию.

Стальные заземлители должны иметь размеры не менее приведенных ниже:

Круглые диаметром, мм	10
Круглые оцинкованные диаметром, мм	6
Прямоугольные	
сечение, мм ²	48
толщина, мм	4
Угловая сталь с толщиной полок, мм	4

В качестве заземляющих проводников могут быть использованы:

а) специально предусмотренные для этой цели проводники;
б) металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т. п.);
в) металлические конструкции производственного назначения (подкрановые пути, каркасы распределительных устройств, галереи, площадки, шахты лифтов, подъемников, элеваторов, обрамление каналов и т. п.);

г) стальные трубы электропроводок;

д) алюминиевые оболочки кабелей;

е) металлические кожухи шинопроводов, металлические короба и лотки электропроводок;

ж) металлические стационарно открыто проложенные трубопроводы любого назначения, кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления. Использование металлических оболочек трубчатых проводов, несущих тросов (при тросовой электропроводке), изоляционных трубок, металлорукавов, а также свинцовых оболочек проводок и кабелей в качестве заземляющих проводников запрещается. В помещениях и на наружных установках, для которых требуется заземление, эти оболочки должны быть заземлены и иметь надежные соединения на всем протяжении; соединительные муфты и коробки должны быть присоединены к металлическим оболочкам пайкой или болтами.

В электроустановках напряжением до 1000 В медные или алюминиевые заземляющие проводники должны иметь сечения не менее приведенных ниже, мм²:

	Из меди	Из алюминия
Голые проводники при открытой прокладке	4	6
Изолированные провода	1,5	2,5
Заземляющие жилы кабелей или многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами	1	1,5

В сетях с напряжением до 1000 В электроустановки заземляют в обязательном порядке, если имеется изолированная нейтраль, а в сетях выше 1000 В во всех случаях. При напряжении переменного тока выше 36 В и постоянного выше 110 В заземляют наружные установки, а также помещения повышенной опасности и особо опасные. Электроустановки не заземляют при номинальном напряжении переменного тока 36 В и ниже и постоянного тока 110 В и ниже.

Известно, что значительная часть производственных помещений химических и деревообрабатывающих предприятий содержит взрывоопасные среды. Поэтому к защитному заземлению таких помещений предъявляют повышенные дополнительные требования. Заземлению подлежат электроустановки при всех напряжениях переменного и постоянного тока, а также оборудование, установленное на заземленных металлических конструкциях (это требование не относится к элементам электрооборудования, установленного внутри заземленных корпусов). В качестве заземлителей должны применяться специально предназначенные для этого проводники (голые или изолированные). Трубы, фермы, свинцовые оболочки кабелей и другие конструкции

могут служить лишь дополнительными заземляющими проводниками.

Места ввода заземляющих проводников в стены взрывоопасных помещений должны быть защищены отрезками труб или должны быть предусмотрены специальные проемы с уплотнением негорючими материалами. Соединение заземляющих проводников в местах вводов не допускается.

При прокладке заземляющих проводников из взрывоопасных помещений в любые отличающиеся по классу взрывоопасности помещения, а также в помещения с нормальной средой или наружу, отрезки труб, проходящих через стены или фундаменты зданий, должны быть заделаны раствором с обеих сторон ввода. Ответвления от магистрали заземления, проходящие через фундаментные отливки, необходимо заключать в трубы или иные жесткие оболочки.

Надежность и долговечность заземляющих устройств в значительной степени определяется правильным расчетом. Цель расчета заземляющих устройств – определить их основные параметры, позволяющие обеспечить выполнение норм, предписанных ПУЭ для данного вида установок, или допустимое напряжение прикосновения.

Защитное действие заземляющих устройств зависит от сопротивления устройства, быстроты и надежности отключения поврежденного участка электроустановки. Эти факторы, в свою очередь зависят от точности расчета заземляющего устройства, правильности его монтажа и эксплуатации. Поэтому перед вводом в эксплуатацию вновь смонтированных электроустановок и электрооборудования, а также периодически в процессе их работы проводят тщательное испытание заземляющих устройств, т. е. выполняют комплекс работ, включающий внешний осмотр подземной и надземной частей устройства, а также измерение сопротивления отдельных его элементов. Объем, нормы и периодичность испытаний заземляющих устройств определяются «Правилами устройств электроустановок», «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

Заземляющие проводники обычно окрашивают в черный цвет, что позволяет распознавать их среди других проводников.

Заземляющие проводники, проложенные в помещениях, должны быть доступны для осмотра. Это требование не относится к нулевым жилам и металлическим оболочкам кабелей, трубопроводам, скрытой электропроводке, к находящимся в земле металлоконструкциям, а

также к проводникам заземления, проложенным в трубах.

Сопrotивление заземляющего устройства измеряют различными приборами, из которых наиболее широкое применение получили приборы МС-08, М-416 и др.

Зануление. Электрические сети современных промышленных предприятий характеризуются значительной протяженностью и большим числом электроприемников. В этих условиях значительные трудности представляет поддержание высокого уровня сопротивления изоляции всей сети относительно земли и отыскание поврежденных участков. Нельзя не считаться и с тем, что даже при обеспечении достаточного уровня изоляции в таких сетях всегда имеются значительные емкостные токи. Исходя из этих соображений, электрические сети выполняют четырехпроводными с заземлением нейтрали. Это решение оправдывается также технологическими соображениями – возможностью использования фазного и линейного напряжения для питания силовой и осветительной сети от одного трансформатора. В качестве основной защитной меры в этих цехах служит зануление – преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. При таком электрическом соединении, если оно надежно выполнено, всякое замыкание на корпус превращается в однофазное короткое замыкание (т. е. замыкание между фазами и нулевым проводом), при этом возникает ток такой силы, при которой обеспечивается срабатывание защиты (предохранителя или автомата) и автоматическое отключение поврежденной установки от питающей сети.

Занулению подлежат те же металлические конструктивные нетоковедущие части электрооборудования, которые подлежат заземлению: корпуса машин и аппаратов, баки трансформаторов и др.

Для обеспечения автоматического отключения аварийного участка сопротивление цепи короткого замыкания должно быть достаточно малым. Поэтому к выбору заземляющих проводников, создающих вместе с фазным и нулевым проводами петлю фаза – нуль, а также к защитным аппаратам предъявляют специальные требования. Это вызвано тем обстоятельством, что от проводимости магистрального провода и ответвления от него зависит сила тока однофазного короткого замыкания, от типа защитного аппарата – время, за которое поврежденный участок

отключится от сети. Чтобы обеспечить требуемую кратность K тока однофазного короткого замыкания по отношению к номинальной силе тока уставки защищаемого аппарата, правила запрещают использовать в качестве магистралей зануления свинцовые оболочки кабелей, а полная проводимость проводников зануления во всех случаях должна составлять не менее 50% проводимости фазных проводников.

Коэффициент K должен быть:

– не менее 3 – при использовании в качестве защиты плавких предохранителей и автоматических выключателей с обратно зависимой от силы тока характеристикой при установке в помещениях с нормальной средой;

– не менее 4 – при использовании предохранителей во взрывоопасных помещениях;

– не менее 6 – при использовании автоматических выключателей с обратно зависимой характеристикой во взрывоопасных помещениях;

– не менее 1,4 – для автоматических выключателей с независимой характеристикой и номинальной силой тока до 100 А при установке во взрывоопасных помещениях и в помещениях с нормальной средой;

– не менее 1,25 – то же, но для автоматических выключателей с независимой характеристикой и номинальной силой тока выше 100 А.

Правила требуют периодической проверки элементов системы зануления. Эта проверка заключается во внешнем осмотре видимой части заземляющего устройства, в осмотре с проверкой наличия цепи между зануляемым оборудованием и заземлением нейтрали источника питания, в измерении сопротивления заземления последнего.

Особое внимание следует уделять надежности металлической связи корпусов электрооборудования с заземленной нейтралью источника питания через нулевой провод. Для обеспечения надежности этой связи Правилами запрещается установка в нулевом проводе предохранителей и выключателей. Непрерывность цепи достигается сваркой отдельных участков сети зануления.

К другим требованиям для повышения эффективности системы зануления относятся заземление нейтрали питающего трансформатора и повторное заземление нулевого провода (для воздушных линий). Заземление нейтрали позволяет уменьшить напряжение на корпусе при пробое изоляции и обеспечить сниже-

ние до безопасного напряжения нулевого провода относительно земли при замыкании фазы на землю, а также осуществить защиту от перехода высшего напряжения в сеть низшего.

Повторное заземление нулевого провода в период замыкания фазы на корпус позволяет снизить напряжение прикосновения к зануленному оборудованию, что особенно важно при обрыве нулевого провода. В кабельных сетях повторные заземления нулевого провода не предусматривают, так как обрыв его маловероятен.

Таким образом, зануление, выполненное в соответствии с требованиями Правил устройства, обеспечивает отключение аварийного участка за сравнительно короткое время и снижает напряжение прикосновения.

4.2. Методика расчета вертикального заземляющего устройства

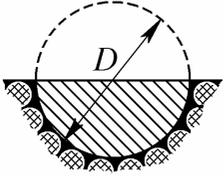
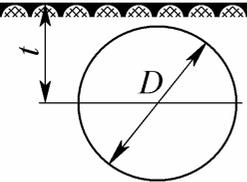
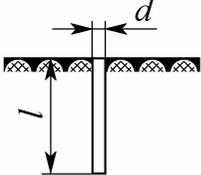
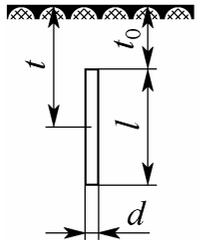
Для расчета заземляющего устройства необходимо иметь следующие исходные данные:

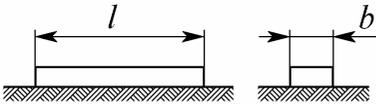
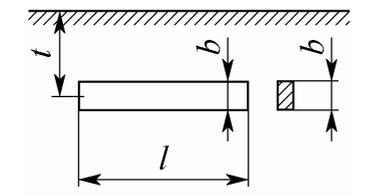
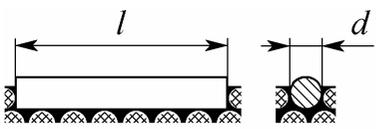
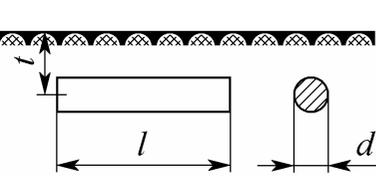
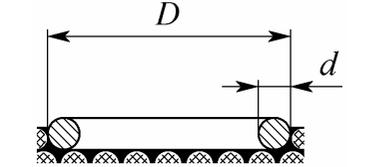
- вид защищаемого объекта (стационарный или нестационарный);
- исполнение сети (с изолированной или глухозаземленной нейтралью);
- напряжение сети (до 1000 В или выше 1000 В);
- мощность источника электроснабжения;
- характеристику грунта (вид грунта, состав грунта (однородный или неоднородный), влажность (малая, нормальная или повышенная));
- климатическую зону;
- тип заземлительного устройства (горизонтальный или вертикальный);
- вид заземлителей (стержни, трубы, уголки);
- размеры вертикальных заземлителей (длина стержня, трубы или уголка, их диаметр или ширина полки для уголков);
- отношение расстояния между стержнями к их длине;
- размеры горизонтального заземлителя (соединительной полосы), определяемого по расчету, и ширину полосы;
- глубину заложения вертикальных или горизонтальных заземлителей.

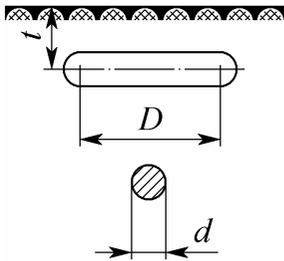
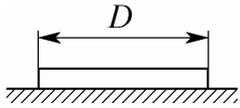
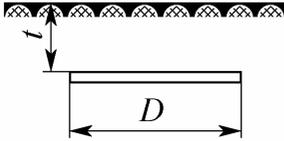
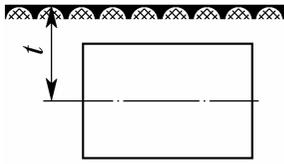
При расчете определяется число заземлителей и величины сопротивления заземляющего устройства по формулам, приведенным в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Формулы для вычисления сопротивления единичных заземлителей растеканию тока

Тип заземлителя	Схема	Формулы	Условия применения
1	2	3	4
Полушаровой у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi D}$	—
Шаровой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi d} \left(1 + \frac{D}{4t} \right)$	$2t > D$
Трубчатый или стержневой у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l > d$ Для уголка с шириной полки b $d = 0,95b$
То же в земле		$R_e = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$ <p>Приближенная (погрешность 5–10%):</p> $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l > d,$ $t_0 \geq 0,5 \text{ м}$ Для уголка с шириной полки b $d = 0,95b$

1	2	3	4
Протяженный полосовой на поверхности земли		$R = \frac{c}{2pl} \ln \frac{4l}{b}$	$l > b$
Протяженный полосовой в земле		$R = \frac{c}{2pl} \ln \frac{2l^2}{bt}$ <p>Приближенная (погрешность до 25%):</p> $R = \frac{c}{pl} \ln \frac{4l}{b}$	$l > 4t,$ $l > b$
Протяженный круглого сечения – стержень, труба, кабель и т. п. – на поверхности земли		$R = \frac{c}{pl} \ln \frac{2l}{d}$	$l > d$
То же в земле		$R = \frac{c}{2pl} \ln \frac{l^2}{dt}$ <p>Приближенная (погрешность до 25%):</p> $R = \frac{c}{pl} \ln \frac{2l}{d}$	$l > 4t,$ $l > d$
Кольцевой круглого сечения на поверхности земли		$R = \frac{c}{p^2 D} \ln \frac{8D}{d}$	Для полосы шириной b $d = 0,5b$

1	2	3	4
Кольцевой круглого сечения в земле		$R = \frac{c}{2\rho^2 D} \ln \frac{4\rho D^2}{dt}$ Приближенная: $R = \frac{c}{\rho^2 D} \ln \frac{8D}{d}$	$D > d,$ $D > 2t$ Для полосы шириной b $d = 0,5b$
Круглая пластина на поверхности земли		$R = \frac{c}{2D}$	D – диаметр пластины
То же в земле		$R = \frac{c}{4D} \left(1 + \frac{2}{\rho} \operatorname{ark} \sin \frac{D}{\sqrt{16t^2 + D}} \right)$ Приближенная (погрешность около 30%): $R = \frac{c}{2D}$	$2t > D$
Пластинчатый в земле (пластина поставлена на ребро)		$R = \frac{c}{4\sqrt{\rho ab}} \left(\frac{\rho}{2} + \operatorname{ark} \sin \sqrt{\frac{ab}{4t^2\rho + ab}} \right)$ Приближенная: $R = \frac{c}{4\sqrt{ab}}$	$t > \sqrt{\frac{ab}{\rho}}$

Примечание. В формулах ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м (1 Ом·м – сопротивление куба грунта с ребром длиной 1 м); все размеры подставляются в метрах, при этом R будет выражено в омах.

Расположение заземлителей предварительно принимают по четырехугольному контуру при числе стержней от 4 до 100 и в один ряд при числе стержней от 2 до 20 (см. рис. 4.1).

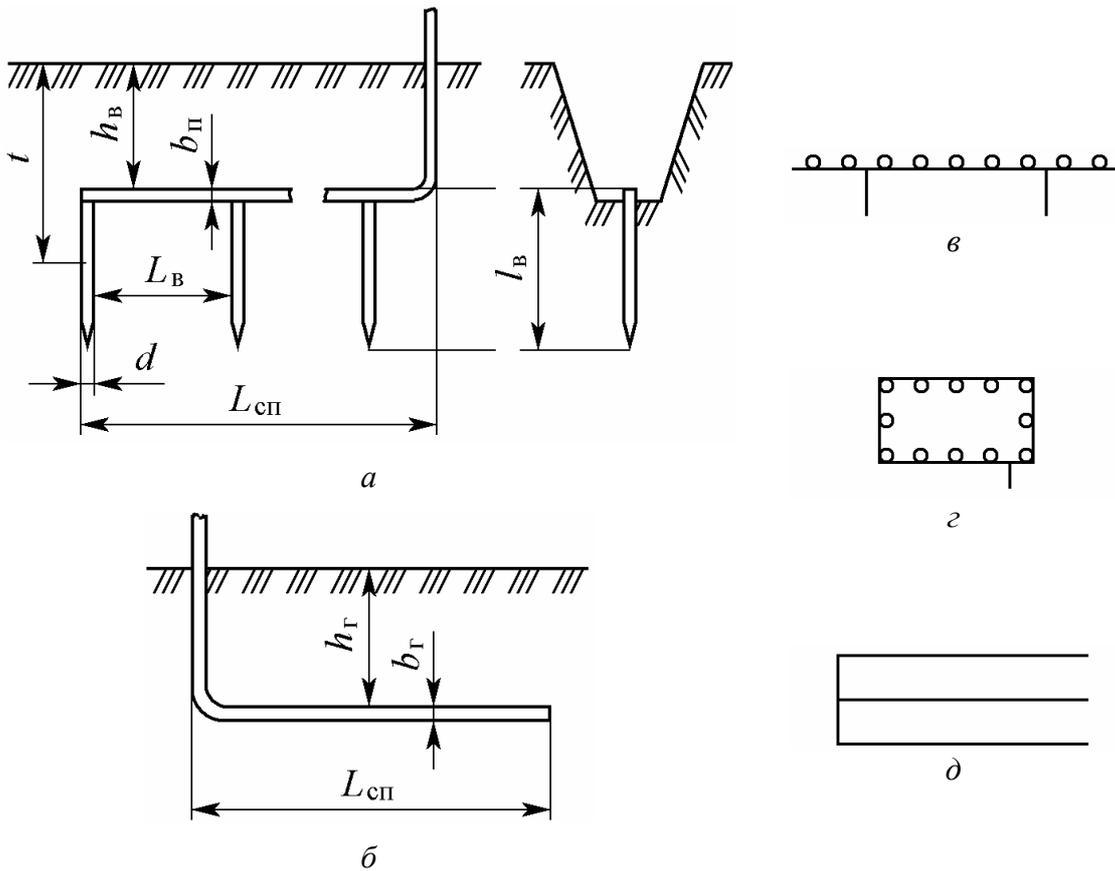


Рис. 4.1. Заземлительные устройства:

- a* – вертикальное; *б* – горизонтальное; *в* – размещение вертикальных заземлителей в плане (в ряд); *г* – размещение вертикальных заземлителей по контуру;
- д* – размещение горизонтальных заземлителей, уложенных параллельно;
- l_B – длина вертикального заземлителя, м; d – диаметр вертикального заземлителя, м;
- L_B – расстояние между вертикальными заземлителями, м; h_B – глубина заложения заземлителей, м; t – расстояние от середины заземлителя до поверхности земли, м;
- $L_{с.п}$ – длина соединяющей полосы, м; $b_П$ – ширина соединяющей полосы, м;
- $l_Г$ – длина горизонтального заземлителя, м

Для стержневого круглого, трубчатого и уголкового заземлителя, расположенного вертикально в земле, сопротивление растеканию тока R_B , Ом, определяется по формуле

$$R_B = 0,366 \frac{\rho_{расч.в}}{l_B} \left(\lg \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right), \quad (4.1)$$

где $\rho_{\text{расч.в}}$ – расчетное удельное сопротивление грунта для вертикального заземлителя, Ом·м; $l_{\text{в}}$ – длина вертикального заземлителя, м; d – диаметр заземлителя, м; заземляющие устройства из уголковой стали в виде стержней, забиваемых в грунт, рассчитывают, исходя из соотношения размеров полки и диаметра труб, составляющего $d = 0,95 b_{\text{п}}$, где $b_{\text{п}}$ – ширина полки уголка; t – расстояние от поверхности земли до середины заземлителя, м.

Потребное число вертикальных заземлителей $n_{\text{п.в}}$ определяется с учетом коэффициента их использования (табл. 4.2 и 4.3), с учетом их расположения по четырехугольному контуру или в один ряд (см. рис. 4.1):

$$n_{\text{п.в}} = \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{и.в}}}, \quad (4.2)$$

где $R_{\text{д}}$ – наибольшее допустимое сопротивление заземляющего устройства (табл. 4.4); $\eta_{\text{и.в}}$ – коэффициент использования вертикальных заземлителей. При $\eta_{\text{и.в}} = 1$ получаем теоретическое число заземлителей $n_{\text{т.в}}$, шт., без учета коэффициента их использования.

Таблица 4.2

Коэффициент $\eta_{\text{и.в}}$ использования вертикальных электродов группового заземлителя (труб, уголков и т. п.) без учета влияния соединяющей полосы

Число заземлителей	Отношение расстояний между электродами к их длине $L_{\text{в}} / l_{\text{в}}$ при их размещении					
	в ряд			по контуру		
	1	2	3	1	2	3
2	0,85	0,91	0,94	–	–	–
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	–	–	–	0,41	0,58	0,66
60	–	–	–	0,39	0,55	0,64
100	–	–	–	0,36	0,52	0,62

Примечания: 1. Коэффициент использования группового заземлителя, точнее использования проводимости группового заземлителя, есть отношение действительной проводимости этого заземлителя $1/R_{\text{гр}}$ к наибольшей возможности его проводимости при бесконечно больших расстояниях между его электродами $1/R_{\infty}$: $\eta_{\text{и.гр}} = R_{\infty}/R_{\text{гр}}$.

2. Коэффициент использования характеризует степень взаимного экранирования электродов, составляющих групповой заземлитель, и зависит от формы электродов, их числа и взаимного расположения.

3. Коэффициенты использования вертикальных стержневых электродов, расположенных на одной прямой или по контуру (см. рис. 4.1, б, в, г), даны без учета влияния горизонтального электрода, связывающего их друг с другом. Для учета полосы связи (горизонтального электрода) см. табл. 4.3.

Таблица 4.3

Коэффициент $\eta_{н.г}$ использования горизонтального полосового электрода, соединяющего вертикальные электроды (трубы, уголки и т. п.) группового заземлителя

Число вертикальных электродов	Отношение расстояний между вертикальными электродами к их длине L_B / l_B					
	в ряд (см. рис. 4.1, в)			по контуру (см. рис. 4.1, г)		
	1	2	3	1	2	3
2	0,85	0,94	0,96	–	–	–
4	0,77	0,80	0,92	0,45	0,55	0,70
6	0,72	0,84	0,88	0,40	0,48	0,64
10	0,62	0,75	0,82	0,34	0,40	0,56
20	0,42	0,56	0,68	0,27	0,32	0,45
40	–	–	–	0,22	0,29	0,39
60	–	–	–	0,20	0,27	0,36
100	–	–	–	0,19	0,23	0,33

Длину соединительной полосы (горизонтального заземлителя) $L_{с.п}$, м, определяют по формуле

$$L_{с.п} = 1,05 (n_{п.в} - 1) L_B, \quad (4.3)$$

где L_B – расстояние между вертикальными заземлителями, м (принимается не менее длины заземлителя).

Определяют сопротивление R_r , Ом, растеканию тока в горизонтальном заземлителе (соединяющей полосе):

$$R_r = 0,366 \frac{\rho_{расч.г}}{L_{с.п}} \lg \frac{2L_{с.п}^2}{h_3 \cdot b_{п}}, \quad (4.4)$$

где $\rho_{расч.г}$ – расчетное сопротивление растеканию тока в горизонтальном заземлителе (соединяющей полосе), Ом; h_3 – расстояние от поверхности земли до соединительной полосы, м; $b_{п}$ – ширина соединительной полосы, м.

При расчете сопротивления растеканию тока в горизонтальной соединительной полосе учитывается коэффициент использования этого заземлителя $\eta_{и.г}$ с учетом числа вертикальных заземлителей и их расположения по четырехугольному контуру или в ряд (табл. 4.3).

Таблица 4.4

**Наибольшие допустимые значения сопротивлений
заземляющих устройств в электроустановках**

№ п/п	Характеристика установок	Наибольшее допустимое сопротивление заземляющего устройства R_d , Ом
Электроустановки напряжением выше 1000 В		
1	Защитное заземление в установках с большими токами замыкания на землю (500 А и более)	0,5
2	Защитное заземление в установках с малыми токами замыкания на землю (до 500 А)	0,5
	без компенсации емкостных токов при использовании заземляющего устройства:	0,5
	а) одновременно для электроустановок до 1000 В	125 / I , но не более 10 (I – расчетный ток замыкания на землю, А)
	б) только для электроустановок выше 1000 В	250 / I , но не более 10 (I – то же)
	с компенсацией емкостных токов:	125 / I , но не более 10 (I – остаточный ток замыкания на землю, возникающий при отключении наиболее мощного из компенсирующих аппаратов, но не менее 30 А)
	а) к заземляющему устройству не присоединены аппараты, компенсирующие емкостный ток	
	б) аппараты, компенсирующие емкостный ток	125/1, но не более 10 (1 – принимают равным 1,25 номинального тока компенсирующих аппаратов)

№ п/п	Характеристика установок	Наибольшее допустимое сопротивление заземляющего устройства $R_{д}$, Ом
Электроустановки напряжением до 1000 В		
3	Установки с глухим заземлением нейтрали при линейных напряжениях, В: а) генераторов или трансформаторов: 660 380 220	2
		4
		8
	б) повторное заземление нулевого рабочего провода воздушной линии электропередачи (ВЛ): 660 380 220	15
		30
		60
	в) все повторные заземления нулевого рабочего провода ВЛ (суммарное сопротивление): 660 380 220	5
		10
		20
	4	Установки с изолированной нейтралью: а) защитное заземление при мощности генераторов и трансформаторов 100 кВ·А и менее
б) то же в остальных случаях		4
в) заземление крючьев и штырей фазных проводов, установленных на железобетонных опорах, а также арматуры этих опор		50
г) заземление металлических оттяжек опор в сетях с изолированной нейтралью, закрепленных нижним концом на высоте менее 2,5 м от земли		10

Примечания: 1. Сопротивления заземляющих устройств в любое время года не должны быть больше указанных значений.

2. К п. 2. В установках с малыми токами замыкания на землю заземляющие устройства можно рассчитывать в соответствии с указаниями п. 2, принимая в качестве расчетного ток срабатывания релейной защиты от междофазных замыканий или ток плавления предохранителей, если эта защита

обеспечивает отключение замыканий на землю. При этом ток замыкания на землю должен быть не менее 1,5-кратного тока срабатывания релейной защиты или 3-кратного номинального тока предохранителей.

3. К п. 3. При удельном сопротивлении земли $\rho > 10$ Ом·м допускается увеличивать указанные нормы в отношении $\rho / 100$, но не более чем в 10 раз.

4. К п. 4а. Если генераторы или трансформаторы работают параллельно, то сопротивление 10 Ом допускается при их суммарной мощности, не превышающей 100 кВ·А.

5. К п. 4в. В сетях с заземленной нейтралью крюки и штыри фазных проводов, устанавливаемые на железобетонных опорах, а также арматура этих опор должны быть присоединены к нулевому заземленному проводу. Заземляющие и нулевые защитные проводники должны иметь диаметр не менее 6 мм. Крюки и штыри, устанавливаемые на деревянных опорах, не заземляют, исключая подлежащие заземлению по условиям защиты от атмосферных перенапряжений, а также устанавливаемые на опорах, где выполнено повторное заземление нулевого провода.

6. К п. 4г. Оттяжки вместо заземления могут быть изолированы при помощи натяжного изолятора, рассчитанного на напряжение ВЛ и установленного на высоте не менее 2,5 м от земли. В сетях с глухозаземленной нейтралью оттяжки опор должны быть присоединены к нулевому заземленному проводу.

7. Сопротивления заземляющих опор ВЛ выше 1000 В приведены в ПУЭ.

8. Правила устройства электроустановок предусматривают отступление от приведенных требований к устройству заземлений в районах с большим удельным сопротивлением земли.

9. Для заземлений электроустановок различных назначений и напряжений следует применять одно общее заземляющее устройство. Исключения допускаются при наличии соответствующих требований ПУЭ.

10. Сопротивление заземляющего устройства, используемого для заземления электроустановок различных назначений и напряжений, должно удовлетворять требованиям к заземлению того электрооборудования, для которого необходимо наименьшее сопротивление заземляющего устройства.

При параллельно уложенных горизонтальных полосовых электродах группового заземлителя коэффициент использования $\eta_{г.п}$ определяют по табл. 4.5.

Общее сопротивление заземляющего устройства $R_{общ}$, Ом, определяют из соотношения

$$R_{общ} = \frac{R_B \cdot R_\Gamma}{R_B + R_\Gamma} . \quad (4.5)$$

Таблица 4.5

Коэффициент использования $\eta_{г.п}$ параллельно уложенных горизонтальных полосовых электродов группового заземлителя (ширина полосы $b_{п} = 20...40$ мм, глубина заложения $h_{г} = 0,3...0,8$ м, см. рис. б; длина каждой полосы $l_{п}$, м)

Число параллельных полос $n_{г}$	Расстояние между параллельными полосами, м				
	1	2,5	5,0	10,0	15,0
$l_{п} = 15$					
2	0,63	0,75	0,83	0,92	0,96
5	0,47	0,49	0,60	0,73	0,79
10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
20	0,16	0,27	0,39	0,57	0,64
$l_{п} = 25$					
5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,73
10	0,23	0,31	0,43	0,57	0,66
20	0,14	0,23	0,33	0,47	0,57
$l_{п} = 50$					
2	0,60	0,69	0,78	0,88	0,93
5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53
20	0,12	0,19	0,25	0,36	0,44
$l_{п} = 75$					
5	0,31	0,38	0,5	0,53	0,58
10	0,18	0,25	0,31	0,41	0,47
20	0,11	0,16	0,22	0,31	0,38
$l_{п} = 100$					
5	0,30	0,36	0,43	0,51	0,57
10	0,17	0,23	0,28	0,37	0,44
20	0,10	0,15	0,20	0,28	0,345
$l_{п} = 200$					
5	0,28	0,32	0,37	0,44	0,50
10	0,14	0,20	0,23	0,30	0,36
20	0,088	0,12	0,15	0,215	0,265

Порядок расчета вертикального заземляющего устройства.

1. Определить наибольшее допустимое сопротивление $R_{д}$ растеканию тока в заземляющем устройстве (табл. 4.4).

2. Определить приближенное удельное сопротивление грунта, рекомендуемое для расчета (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Значения удельных электрических сопротивлений $\rho_{\text{табл}}$, Ом·м, различных грунтов и воды

Грунт, вода	Возможные пределы колебаний $\rho_{\text{табл}}$	При влажности 10–20% к массе грунта	Рекомендуемые значения для приближенных расчетов
Глина	8–70	40	40
Суглинок	40–150	100	100
Чернозем	9–53	20	20
Торф	10–30	20	20
Садовая земля	30–60	40	40
Супесь	150–400	300	300
Песок	400–700	700	700
Каменистый	500–800	–	–
Скалистый	10^4 – 10^7	–	–
Вода:			
морская	0,2–1	–	1
речная	10–100	–	80
прудовая	40–50	–	50
в ручьях	10–60	–	60
грунтовая	20–70	–	50

Примечания: 1. Удельное электрическое сопротивление грунта есть сопротивление куба грунта с ребром 1 м.

2. При малом процентном содержании влаги в грунте возможны большие значения сопротивлений.

3. Удельные сопротивления грунтов колеблются в течение года, что учитывают при расчетах введением так называемых сезонных коэффициентов сопротивления грунта (см. табл. 4.7–4.9)/

3. Определить коэффициент сезонности ($K_{с.в}$) для вертикальных заземлителей (электродов) по заданной климатической зоне и данным табл. 4.7–4.8.

Таблица 4.7

Признаки климатических зон для определения коэффициентов сезонности

Характеристика климатической зоны	Климатические зоны			
	I	II	III	IV
Средняя многолетняя низшая температура (январь), °С	От –20 до –15	От –14 до –10	От –10 до 0	От 0 до +5
Средняя многолетняя высшая температура (июль), °С	От +16 до +18	От +18 до +22	От +22 до +24	От +24 до +26
Среднегодовое количество осадков, см	40	50	50	30–50
Продолжительность замерзания вод, сутки	190–170	150	100	0

Примечание. Изменение значения удельного сопротивления грунта различно в течение года в разных климатических зонах страны, а следовательно, в этих зонах различны и коэффициенты сезонности.

4. Определить значение коэффициента сезонности для горизонтального заземлителя ($K_{с.г}$) по заданной климатической зоне и данным табл. 4.7–4.8. Для многослойных грунтов коэффициент сезонности $K_{с.м.с}$ определяют по табл. 4.9.

Таблица 4.8

Коэффициенты сезонности $K_{с.в}$ и $K_{с.г}$ для однородной земли при измерении ее сопротивления

Климатическая зона	Влажность земли при измерении		
	повышенная	нормальная	малая
$K_{с.в}$ для вертикального электрода длиной $l_{в} = 3$ м			
I	1,9	1,7	1,5
II	1,7	1,5	1,3
III	1,5	1,3	1,2
IV	1,3	1,1	1,0
То же для $l_{в} = 5$ м			
I	1,5	1,4	1,3
II	1,4	1,3	1,2
III	1,3	1,2	1,1
IV	1,2	1,1	1,0
$K_{с.г}$ для горизонтального электрода длиной $l_{г} = 10$ м			
I	9,3	5,5	4,1
II	5,9	3,5	2,6
III	4,2	2,5	2,0
IV	2,5	1,5	1,1
То же для $l_{г} = 50$ м			
I	7,2	4,5	3,6
II	4,8	3,0	2,4
III	3,2	2,0	1,6
IV	2,2	1,4	1,12

Примечания: 1. При проектировании заземляющих устройств в качестве расчетного необходимо брать наибольшее возможное в течение года значение удельного сопротивления земли $\rho_{табл}$, т. е. ориентироваться на худший вариант. Измерение $\rho_{изм}$ в самое неблагоприятное время при наиболее неблагоприятной погоде на практике затруднено. Поэтому данные измерения производят, как правило, в теплое время года (май – октябрь) и измеренное удельное сопротивление $\rho_{изм}$ умножают на коэффициенты сезонности $K_{с.в}$ и $K_{с.г}$, учитывающие возможности повышения сопротивления в течение года и состояние (увлажненность) земли во время измерений. В итоге рассчитывают: для вертикальных заземлителей $\rho_{расч.в} = \rho_{изм} \cdot K_{с.в}$, для горизонтальных $\rho_{расч.г} = \rho_{изм} \cdot K_{с.г}$.

2. Считают, что земля повышенной влажности, если измерению ее сопротивления предшествовало выпадение большого количества (свыше нормы) осадков; нормальной влажности, если измерению предшествовало выпадение неболь-

шого количества (близкого к норме) осадков; малой влажности, если земля сухая, количество осадков в предшествующий измерению период ниже нормы.

3. Заглубление электродов, т. е. расстояние от поверхности земли до верхнего конца вертикального электрода h_v и до горизонтального электрода h_r , равно 0,7–0,8 м.

Таблица 4.9

Коэффициент сезонности $K_{с.м.с}$ для слоя сезонных изменений в многослойной земле при измерении ее сопротивления

Климатическая зона	Условная толщина слоя сезонных измерений, м	Влажность земли при измерении		
		повышенная	нормальная	малая
I	2,2	7,0	4,0	2,7
II	2,0	5,0	2,7	1,9
III	1,8	4,0	2,0	1,5
IV	1,6	2,5	1,4	1,1

Примечания: 1. См. примечания 1, 2 к табл. 4.8.

2. Для многослойной земли при получении значений удельных сопротивлений $\rho_{изм}$ нескольких слоев на коэффициент сезонности K_c умножают значения $\rho_{изм}$ только слоев, лежащих в пределах толщины слоя сезонных измерений.

5. Вычислить расчетное удельное сопротивление грунта для вертикальных заземлителей определить по формуле

$$\rho_{расч.в} = \rho_{табл} \cdot K_{с.в} . \quad (4.6)$$

6. Определить расчетное удельное сопротивление грунта для горизонтальных заземлителей:

$$\rho_{расч.г} = \rho_{табл} \cdot K_{с.г} . \quad (4.7)$$

7. Определить расстояние от поверхности земли t , м, до середины вертикального заземлителя (рис.):

$$t = h_3 + l_v/2 . \quad (4.8)$$

8. Рассчитать сопротивление растеканию тока R_v , Ом, в одном вертикальном заземлителе (см. формулу (4.1)).

9. Определить теоретическое число вертикальных заземлителей $n_{т.в}$, шт., без учета коэффициента использования $\eta_{и.в}$, т. е. $\eta_{и.в} = 1$:

$$n_{т.в} = \frac{R_v}{R_d \cdot \eta_{и.в}} . \quad (4.9)$$

10. По табл. 4.2 определить коэффициент использования вертикальных заземлителей $\eta_{и.в}$ с учетом их расположения.

11. Рассчитать требуемое число $n_{п.в}$, шт., вертикальных одинаковых заземлителей с учетом коэффициента использования (см. формулу (4.2)).

12. Определить расчетное сопротивление $\rho_{расч.в}$, Ом, растеканию тока в вертикальных заземлителях без учета влияния соединяющей полосы:

$$\rho_{расч.в} = \frac{R_B}{n_{п.в} \cdot \eta_{и.в}} . \quad (4.10)$$

13. Определить расстояние между вертикальными заземлителями L_B , м, по отношению $L_B / l_B = 1$.

14. Определить длину соединяющей полосы $L_{с.п}$, м, горизонтального заземлителя (электрода) (см. формулу (4.3)).

15. Определить сопротивление растеканию тока в горизонтальном заземлителе (соединяющей полосе) $R_{г.с.п}$, Ом:

$$R_{г.с.п} = 0,366 \cdot \frac{\rho_{расч.г}}{L_{с.п}} . \quad (4.11)$$

16. Определить коэффициент использования горизонтального заземлителя ($\eta_{и.г}$) при расположении вертикальных заземлителей согласно исходным данным или по четырехугольному контуру при отношении $L_B / l_B = 1$ и требуемом числе вертикальных заземлителей $n_{п.в}$ (табл. 4.3). При параллельно уложенных горизонтальных заземлителях $\eta_{и.г}$ определяют по табл. 4.5.

17. Определить расчетное сопротивление $R_{расч.г}$, Ом, растеканию тока в горизонтальном заземлителе (соединяющей полосе) при $n_g = 1$:

$$R_{расч.г} = \frac{R_{г.с.п}}{n_g \cdot \eta_{и.г}} . \quad (4.12)$$

18. Определить общее расчетное сопротивление $R_{общ}$, Ом, растеканию тока в вертикальных и горизонтальном заземлителях:

$$R_{общ} = \frac{R_{расч.в} \cdot R_{расч.г}}{R_{расч.в} + R_{расч.г}} . \quad (4.13)$$

19. По табл. 4.10 выбрать материал и сечение соединительных проводников и материал, сечение, толщину магистральной шины.

20. Дать схему соединения оборудования с магистральной шиной и соединение магистральной шины с заземляющим устройством (соединительной полосой).

Таблица 4.10

Наименьшие размеры заземляющих и нулевых защитных проводников

Характеристика проводника	Нормируемый размер	Наименьший допустимый размер в зависимости от материала				
		Медь	Алюминий	Сталь		
				В зданиях	Вне здания	В земле
Неизолированные проводники	Сечение, мм ²	4,0	6,0	–	–	–
	Диаметр, мм	–	–	5,0	6,0	10
Изолированные провода	Сечение, мм ²	1,5	2,5	–	–	–
Заземляющие и нулевые жилы кабелей и многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами	Сечение, мм ²	1,0	2,5	–	–	–
Угловая сталь	Толщина полки, мм	–	–	2,0	2,5	4,0
Полосовая сталь	Сечение, мм ²	–	–	24	48	48
	Толщина, мм	–	–	3,0	4,0	4,0
Водогазопроводные трубы (стальные)	Толщина стенки, мм	–	–	2,5	2,5	3,5
Тонкостенные трубы (стальные)	Толщина стенки, мм	–	–	1,5	2,5	–

Примечания: 1. Сечение медных нулевых защитных проводников допускается 1 мм², при прокладке в трубах и фазные проводники имеют то же сечение.

2. В электроустановках выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью сечения заземляющих проводников выбраны так, чтобы при протекании по ним расчетных токов однофазных замыканий на землю температура заземляющих проводников не превысила 400°С (кратковременный нагрев, соответствующий времени действия основной защиты).

3. В электроустановках до и выше 1000 В с изолированной нейтралью проводимость заземляющих проводников должна составлять не менее 1/3 проводимости фазных проводников, а сечение – не менее приведенных в табл. 4.10. Не требуется применения проводников сечением, мм²: медных – более 25, алюминиевых – 35, стальных – 120. В производственных помещениях с электроустановками выше 1000 В магистрали заземления из стальной полосы должны иметь сечение не менее 120, а до 1000 В – не менее 100 мм². В указанных случаях допустимо применение круглой стали той же проводимости.

4. В электроустановках до 1000 В с глухим заземлением нейтрали с целью обеспечения автоматического отключения аварийного участка нулевые защитные проводники выбирают таким образом, чтобы при замыкании на корпус или на нулевой проводник возникал ток короткого замыкания, превышающий не менее чем в три раза номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя и но-

минальный ток расцепителя автоматического выключателя с обратной зависимой от тока характеристикой. При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель (отсечку), нулевой защитный проводник выбирается таким образом, чтобы в цепи фаза – нуль был обеспечен ток короткого замыкания, равный уставке тока мгновенного срабатывания, величину которого умножают на коэффициент, учитывающий разброс (по заводским данным), и на коэффициент запаса, равный 1,1. При отсутствии заводских данных для автоматов с номинальным током до 1000 А кратность тока короткого замыкания относительно уставки принимают равной 1,4, для автоматов с номинальным током до 100 А – 1,25. Полная проводимость нулевых защитных проводников во всех случаях не менее 50% проводимости фазного проводника. Если настоящие требования не удовлетворяются в отношении тока замыкания на корпус или на нулевой проводник, отключение при этих замыканиях обеспечивают при помощи специальных защит. Условия в отношении тока отключения проверяются испытаниями или измерениями до пуска электроустановки в эксплуатацию, а также периодически в процессе ее эксплуатации.

5. В электроустановках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью нулевые защитные проводники рекомендуется прокладывать совместно или в непосредственной близости с фазными.

6. Нулевые рабочие проводники должны иметь изоляцию, равноценную изоляции фазных проводников. Исключения допускаются в случаях применения шин в щитках, шкафах, сборках, шинопроводах и т. п., при этом должен быть обеспечен надежный контакт между шинами и конструкцией, к которой они прикреплены.

7. Нулевой рабочий проводник рассчитывается на длительное протекание рабочего тока. Использование металлоконструкций зданий, трубопроводов и оборудования в качестве нулевого рабочего проводника запрещается.

21. Составить паспорт на заземляющее устройство. Наименьшие размеры заземлителей приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Наименьшие размеры стальных заземлителей

Форма заземлителя	Нормируемый размер	Наименьший допустимый размер
Круглый (прутковый)	Диаметр, мм	10
То же оцинкованный	Диаметр, мм	6
Полосовая сталь	Сечение, мм ²	48
Угловая сталь	Толщина полка, мм	4
Стальные трубы	Толщина стенок, мм	3,5

Примечания: 1. Для заземления электроустановок в первую очередь используют естественные заземлители. Если эти заземлители имеют сопротивление растеканию, удовлетворяющее требованиям ПУЭ, то искусственного заземлителя не требуется.

2. Для устройства искусственных заземлителей допустимо применение электропроводящего бетона.

3. Заземлители не должны иметь окраски. Не следует размещать заземлители в местах, где земля подсушивается под действием тепла трубопроводов и других источников тепла. В случае опасности усиленной коррозии заземлителей применяют один из следующих способов: а) увеличение сечения одиночных заземлителей (электродов); б) использование оцинкованных или омедненных заземлителей (электродов); в) электрическая защита против коррозии.

4.3. Методика расчета горизонтального заземляющего устройства

Для расчета заземляющего устройства необходимо иметь следующие исходные данные: наименование защищаемого устройства и его вид (стационарный или нестационарный); напряжение сети; исполнение сети; тип заземляющего устройства; размеры заземлителей (длина и ширина полосы); расположение заземлителей (параллельное или нет); расстояние между параллельными заземлительными полосами; глубина заложения заземлителей; вид грунта; характеристика грунта по однородности состава и влажности; климатическая зона.

Расчет сводится к определению числа параллельно уложенных заземлительных полос и величины сопротивления растеканию тока (рис. 4.1, *д*). Полученное расчетное сопротивление растеканию тока должно удовлетворять требованиям ПУЭ, ПТЭ, ПТБ (табл. 4.4).

Теоретическое сопротивление R_r , Ом, растеканию тока в одном горизонтальном заземлителе рассчитывают по зависимости для заглубленной горизонтальной полосы по формуле

$$R_r = \frac{\rho_{\text{расч.г}}}{l_{\text{п}}} \lg \frac{2l_{\text{п}}^2}{h_3 b_r}, \quad (4.14)$$

где $\rho_{\text{расч.г}}$ – расчетное удельное сопротивление растеканию тока грунта для горизонтальных заземлителей, Ом·м; $l_{\text{п}}$ – длина горизонтальной полосы, м; h_3 – глубина расположения горизонтальной полосы, м; b_r – ширина полосы, м.

Расчетное удельное сопротивление грунта для горизонтальных заземлителей определяют по формуле (4.7).

Значения $\rho_{\text{табл}}$ и $K_{\text{с.г}}$ принимают по табл. 4.6 и 4.8.

Потребное число $n_{\text{г.п}}$ горизонтальных заземлителей (полос) рассчитывают по приведенному ниже соотношению с использованием данных табл. 4.4 и 4.5:

$$n_{г.п} = \frac{R_{г}}{R_{д} \cdot \eta_{и.г}}. \quad (4.15)$$

Расчетное сопротивление $R_{расч.г}$, Ом, растеканию тока в заземляющем устройстве будет равно

$$R_{расч.г} = \frac{R_{г}}{n_{г.п} \cdot \eta_{и.г}}. \quad (4.16)$$

Порядок расчета.

1. Нарисовать схему заземлительного устройства с условными обозначениями (рис. 4.1д).

2. Определить наибольшее допустимое нормированное сопротивление $R_{д}$, Ом, растеканию тока в заземлительном устройстве (табл. 4.4).

3. По табл. 4.6 определить приближенное удельное сопротивление грунта.

4. Определить значение коэффициента сезонности $K_{с.г}$ для заданного вида и характеристики грунта с учетом климатической зоны (табл. 4.8).

5. Определить расчетное удельное сопротивление $\rho_{расч.г}$, Ом·м, грунта для горизонтальных заземлителей (см. формулу (4.7)).

6. Определить теоретическое сопротивление растеканию тока в одном горизонтальном заземлителе (см. формулу (4.14)).

7. Определить теоретическое число горизонтальных заземлителей $n_{г}$ без учета коэффициента их использования $\eta_{и.г}$, т. е. примем $\eta_{и.г} = 1$:

$$n_{г} = \frac{R_{г}}{R_{д} \cdot \eta_{и.г}}. \quad (4.17)$$

8. Определить коэффициент использования параллельно уложенных горизонтальных заземлителей $\eta_{и.г}$ (табл. 4.5).

9. Определить потребное число горизонтальных заземлителей (полос) $n_{п.г}$ (см. формулу (4.15)).

10. Определить расчетное сопротивление $R_{расч.г}$, Ом, растеканию тока в заземлительном устройстве (см. формулу (4.15)).

Полученное расчетное сопротивление растеканию тока должно удовлетворять требованиям ПУЭ, ПТЭ, ПТБ

$$R_{расч.г} \leq R_{д}.$$

4.4. Методика расчета заземляющего устройства с использованием естественного заземления

Для расчета данного типа заземляющего устройства необходимо иметь следующие исходные данные: наименование защищаемого объекта и его вид (стационарный или нестационарный); напряжение сети и ее исполнение; вид естественного заземления (например, свайное основание здания); величина измеренного сопротивления растеканию тока в естественном заземлителе $R_{e.з}$; тип дополнительного искусственного заземления (например, вертикальный из труб); размер заземлителей (длина l_v и их диаметр d); расположение заземлителей; ширина соединительной полосы b_p ; вид и характеристика грунта (состав, влажность, агрессивность) и климатическая зона.

Если величина измеренного сопротивления растеканию тока в естественном заземлителе $R_{e.з}$ превышает требования ПУЭ, ПТЭ и ПТБ (табл. 4.4), то к естественному заземлительному устройству предусматривается дополнительное искусственное. Методика расчета искусственного вертикального и горизонтального устройства были рассмотрены выше.

Ниже приведем порядок расчета комбинированного (включающего естественное и искусственное) заземлительного устройства.

Порядок расчета.

1. Принять тип дополнительного искусственного заземления, например вертикальный из труб.

2. Определить допустимое (нормированное) сопротивление R_d , Ом, растеканию тока в заземлительном устройстве (естественном и искусственном) согласно ПУЭ (табл. 4.4).

3. Определить расчетное сопротивление $R_{расч.и.з}$, Ом, растеканию электрического тока в искусственном заземлении. При известном (измеренном) естественном сопротивлении растеканию тока в естественном заземлителе $R_{e.з}$

$$R_{расч.и.з} \leq \frac{R_d \cdot R_{e.з}}{R_{e.з} - R_d}. \quad (4.18)$$

4. Определить $\rho_{табл}$ – приближенное удельное сопротивление грунта, рекомендуемое для расчета (табл. 4.6).

5. Определить $K_{с.в}$ – коэффициент сезонности для вертикальных заземлителей длиной l_B по заданной климатической зоне и влажности грунта (табл. 4.8).

6. Определить $\rho_{расч.в}$ – расчетное удельное сопротивление грунта для вертикальных заземлителей (см. формулу (4.6)).

7. Определить расстояние t от поверхности земли до середины заземлителя (трубы, стержня).

8. Определить R_B , Ом, – сопротивление растеканию тока в одном вертикальном заземлителе (см. формулу (4.1)).

9. Определить $n_{т.в}$, шт, – теоретическое число вертикальных заземлителей без учета $\eta_{и.в}$ – коэффициента использования, т. е. $\eta_{и.в} = 1$ (см. формулу (4.9)).

10. Определить $\eta_{и.в}$ – коэффициент использования вертикальных заземлителей с учетом их расположения (в один ряд или по четырехугольному контуру) и при отношении $L_B/l_B = 1$ (табл. 4.2).

11. Определить $n_{п.в}$ – потребное число вертикальных одинаковых заземлителей с учетом коэффициента их использования $n_{и.в}$ (см. формулу (4.2)).

12. Определить расчетное сопротивление $R_{расч.в}$, Ом, растеканию тока в вертикальных заземлителях ($n_{п.в}$) без учета влияния горизонтального заземлителя (соединяющей полосы) (см. формулу (4.10)).

13. Определить L_B , м, – расстояние между вертикальными заземлителями при отношении $L_B/l_B = 1$.

14. Определить $L_{с.п}$, м, – длину соединяющего горизонтального заземлителя (полосы) (см. формулу (4.3)).

15. Определить значение $K_{с.г}$ – коэффициента сезонности для горизонтального заземлителя, соединяющего вертикальные заземлители и естественный заземлитель при длине $L_{с.п}$, заданной влажности и заданной климатической зоне (табл. 4.8).

16. Определить $\rho_{расч.г}$, Ом·м, – расчетное удельное сопротивление грунта для горизонтального заземлителя (см. формулу (4.7)).

17. Определить R_G , Ом, – сопротивление растеканию тока в горизонтальном заземлителе (соединяющей полосе) (см. формулу (4.14)).

18. Определить $\eta_{и.г}$ – коэффициент использования горизонтального заземлителя при принятом расположении вертикальных заземлителей при отношении $L_B/l_B = 1$ и расчетном (потребном) их количестве $n_{п.в}$ (табл. 4.3).

19. Определить $R_{расч.г}$, Ом, – расчетное сопротивление растеканию тока в горизонтальном заземлителе (соединяющей полосе) при их

числе n_T и величине $\eta_{и.г}$ – коэффициента использования горизонтального заземлителя (см. формулу (4.16)).

20. Общее расчетное сопротивление $R_{расч.в.г}$, Ом, растеканию тока в искусственных заземлителях (вертикальных и горизонтальных) определить по формуле (4.13).

21. Определить $R_{общ.е.и}$, Ом, – общее сопротивление растеканию тока в естественном и искусственном заземлителях:

$$R_{общ.е.и} = \frac{R_{з.е} \cdot R_{расч.в.г}}{R_{з.е} + R_{расч.в.г}}. \quad (4.19)$$

Полученное общее расчетное сопротивление растеканию тока в естественном и искусственном заземлителях должно удовлетворять требованиям ПУЭ, ПТЭ и ПТБ (табл. 4.4).

4.5. Методика расчета зануления

Для расчета зануления необходимо иметь следующие исходные данные: напряжение сети; потребляемая электрооборудованием мощность; режим работы оборудования для определения коэффициента β , характеризующего отношение пускового тока к номинальному (принимается по каталогу на электрооборудование: для электродвигателей с фазным ротором принимается $\beta = 1,5-2$, для двигателей с короткозамкнутым ротором $\beta = 5-8$); коэффициент полезного действия электродвигателя при номинальной мощности (определяется по паспорту); коэффициент мощности $\cos\phi$ (принимается равным 0,8–0,9).

Расчет сводится к определению величины тока короткого замыкания и подбору сечения зануляющего проводника.

В четырехпроводной сети напряжением 380/220 В или 220/127 В ток однофазного короткого замыкания $I_{к.з}$, А, определяются по формуле

$$I_{к.з} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + \sqrt{(r_{пр} + r_{дв} + r_n)^2 + X_{дв}^2}}, \quad (4.20)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В; $r_{пр}$, $r_{дв}$, r_n – соответственно активные сопротивления фазного провода, двигателя, нулевого провода, Ом; $X_{дв}$ – общее индуктивное сопротивление двигателя,

Ом; Z_T – полное сопротивление трансформатора. Вследствие небольших значений этой величины в практических расчетах ею пренебрегают.

Быстрое и надежное отключение электроустановки при коротком замыкании будет обеспечено при условии, если:

1) при защите сети плавкими предохранителями

$$I_{к.з} \geq 3I_{н.вст} \text{ (для невзрывоопасных помещений);}$$

$$I_{к.з} \geq 4I_{н.вст} \text{ (для взрывоопасных помещений);}$$

2) при защите сети автоматическими выключателями с электромагнитными расцепителями

$$I_{к.з} \geq 1,25I_{ср.эл.м} \text{ (для невзрывоопасных помещений);}$$

$$I_{к.з} \geq 2I_{ср.эл.м} \text{ (для взрывоопасных помещений),}$$

где $I_{ср.эл.м}$ – ток срабатывания (ток уставки) электромагнитного расцепителя (наименьший ток, на который он отрегулирован).

Ток срабатывания $I_{ср.эл.м}$ должен превышать максимальный ток I_{max} не менее чем на:

$$I_{ср.эл.м} \geq 1,35I_{max} \text{ (для автоматов АЗ120, АЗ130, АЗ140);}$$

$$I_{ср.эл.м} \geq 1,65I_{max} \text{ (для автоматов АЗ110);}$$

$$I_{ср.эл.м} \geq 1,215I_{max} \text{ (для автоматов АП50).}$$

Порядок расчета зануления.

1. По каталогу на электрооборудование определить коэффициент β , характеризующий отношение пускового тока к номинальному.

2. По паспорту на электродвигатель определить коэффициент его полезного действия η .

3. Определить $\cos\varphi$ – коэффициент мощности (принимается равным 0,8–0,9).

4. Определить I_n , А, – номинальный ток, потребляемый электродвигателем при работе:

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_n \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad (4.21)$$

где P_n – потребляемая мощность, кВт; U_n – напряжение сети, В.

5. Определить $I_{пуск}$ – пусковой ток электродвигателя:

$$I_{пуск} = I_n \cdot \beta, \quad (4.22)$$

где β – отношение $I_{пуск} / I_n$.

6. Определить α – коэффициент, зависящий от режима перегрузки предохранителя, его типа и условий пуска электродвигателя (табл. 4.12).

Значение коэффициента α

Тип и марка предохранителя		Материал вставки	Рекомендуемые значения	
			для легких условий пуска электродвигателя и самозапуска его при холостом ходе механизма	для тяжелых условий пуска электродвигателя и самозапуска его при нагруженном механизме
Инерционный	Е-27 и Е-33 при $I_{н.вст} \leq 35A$	Свинец	$I_{н.вст} \geq I_{раб}$	3,75
	СПО или ПТ			
Малоинерционный	ПР-2 при $I_{н.вст} \geq 35A$	Цинк	3	2
		Медь		
Безинерционный	Е-33 при $I_{н.вст} = 60A$	Серебро	2,5	1,6
	КП, НПН, НПР, П при $I_{н.вст} \leq 35A$	Медь		

Примечание. При отсутствии данных в таблице значение коэффициента принимается равным 2,5.

7. Определить номинальный ток плавкой вставки предохранителя:

$$I_{н.вст} \geq I_{пуск} / \alpha. \quad (4.23)$$

По полученному значению принимаем плавкую вставку с током $I_{н.вст}$, равным расчетному или ближайшему большему по шкале номинальных токов плавких вставок предохранителей $I_{н.вст}$, А: 6, 10, 15, 20, 25, 35, 45, 60, 80, 100, 125, 160, 200, 225, 250, 300, 350, 430, 500, 600, 700, 850, 1000.

8. По принятому значению $I_{н.вст}$ подобрать материал и сечение подводящих проводников (прил. 11). Определить для них предельно допустимый ток.

9. По справочнику [2] найти значения сопротивлений

$$r_{дв} = R'_1 + R''_2;$$

$$X_{дв} = X_1 + X_2.$$

10. Определить r_n – активное сопротивление нулевого провода:

$$r_n = \rho l / s,$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода, Ом·м; l – принятая длина участка нулевого провода одинакового сечения из одного материала, м; s – принятая площадь поперечного сечения провода, мм², исходя из условия, что площадь поперечного сечения нулевого провода должна быть в два раза меньше сечения токопроводящих проводов.

11. Определить $r_{\text{пр}}$ – активное сопротивление фазного провода:

$$r_{\text{пр}} = \rho l_{\text{ф}} / s,$$

где $l_{\text{ф}}$ – принятая длина токопроводящих проводов, .

12. Рассчитать $I_{\text{к.з}}$ – ток короткого замыкания (см. формулу (4.20)).

Условие выполняется, если отношение $I_{\text{к.з}} / I_{\text{н.вс}} > 3$ и, следовательно, действие зануления обеспечено.

5. МОЛНИЕЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

5.1. Общие положения

Для защиты зданий и сооружений от воздействия разрядов молнии применяются различные виды молниеотводов. Основными конструктивными элементами молниеотводов являются: молниеприемник, непосредственно воспринимающий удар молнии, токоотвод, соединяющий молниеприемник с заземляющим устройством, заземляющее устройство, служащее для отвода тока молнии в землю.

Зона защиты любого молниеотвода охватывает пространство, которое практически не может быть поражено прямыми ударами молнии. Для эффективности защиты объектов необходимо, чтобы все его части находились в зоне защиты.

Молниеотводы в зависимости от типа молниеприемника разделяются на стержневые и тросовые, а по количеству совместно действующих молниеотводов – на одностержневые, двукратные и многократные.

Для помещений длиной до 15 м целесообразно устанавливать один стержневой молниеотвод в центре крыши здания, для помещений длиной от 15 до 25 м – один молниеотвод около наружной продольной стены здания (на середине его длины) на расстоянии не менее 4 м от стены.

Для зданий длиной от 25 до 70 м и шириной до 18 м целесообразна установка двукратных стержневых молниеотводов. При ширине больше 18 м, а длине от 50 до 100 м защиту следует создавать многократными молниеотводами.

При устройстве молниезащиты следует руководствоваться требованиями РД 34.21.122–87 [2].

При устройстве молниезащиты I и II категорий обеспечивается защита зданий и сооружений от прямых ударов молнии, вторичных проявлений молнии и заноса высокого потенциала через наземные и подземные металлические коммуникации. При устройстве молниезащиты III категории здания и сооружения защищаются от прямых ударов молнии и заноса высокого потенциала через наземные металлические коммуникации.

Защита от прямых ударов молнии для I категории молниезащиты выполняется отдельно стоящими стержневыми или тросовыми молниеотводами, которые должны обеспечивать зону защиты типа А. Молниезащита II категории может быть выполнена отдельно стоящими или установленными на защищаемом объекте стержневыми или тросовыми молниеотводами, обеспечивающими зону защиты в соответствии с требованиями прил. 12.

Молниезащита III категории осуществляется установкой на защищаемом объекте стержневых и тросовых молниеотводов или укладкой на кровлю сверху или под гидроизоляцию и утеплитель молниеприемной сетки с шагом ячеек не более 12×12 м.

5.2. Методика расчета молниезащиты

Исходные данные для расчета молниезащиты здания: место расположения защищаемого объекта; наименование объекта; характеристика здания (этажность, вид кровли, наличие возвышающихся над кровлей устройств); размеры здания с учетом возвышающихся над кровлей устройств; расстояние от центра возвышающихся устройств до края крыши здания; расстояние от продольной оси здания до продольной оси молниезащиты; тип молниезащитного устройства (стержневой одиночный, многократный, тросовый); удельное сопротивление грунта; климатическая зона.

Одиночные стержневые молниеотводы имеют зону защиты в виде конуса с определенной степенью надежности защиты. Зона защиты типа А обеспечивает надежность 99,5% и выше, зона Б – надежность 95% и выше.

Соотношение размеров зон защиты типов А и Б приведено на рис. 5.1.

Наибольшая высота молниеотвода не должна превышать 150 м.

При известной высоте защищаемого объекта h_x и радиусе зоны защиты на этой высоте R_x полная высота молниеотвода для зоны А:

$$h = \frac{1,1 + 0,0024h_x \pm \sqrt{(1,1 + 0,0024h_x)^2 - 0,01h_x - 0,008R_x}}{0,004}, \quad (5.1)$$

для зоны Б:

$$h = (R_x + 1,63h_x) / 1,5. \quad (5.2)$$

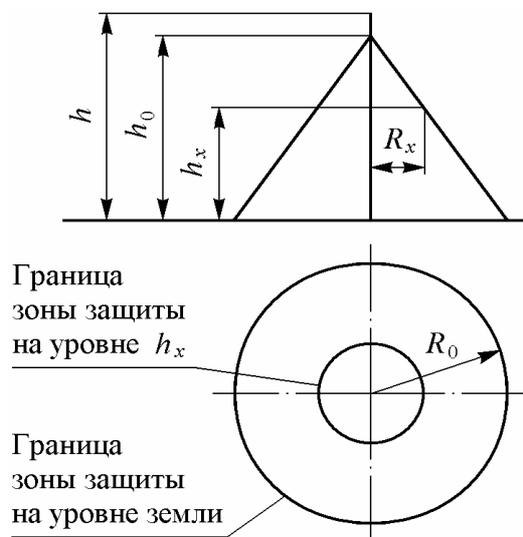


Рис. 5.1. Зона защиты одиночного молниеотвода:
 h – высота молниеотвода; h_0 – высота зоны защиты;
 h_x – высота защищаемого здания; R_0 – граница зоны защиты
на уровне земли; R_x – радиус зоны защиты на высоте h_x

Зона А	Зона Б
$h_0 = 0,85h$	$h_0 = 0,92h$
$R_0 = (1,1 - 0,002h)h$	$R_0 = 1,5h$
$R_x = (1,1 - 0,002h)[h - (h_x/0,85)]$	$R_x = 1,5[h - (h_x/0,92)]$

Радиус зоны защиты на высоте h_x определяется по формуле

$$R_x = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + (S + l)^2}, \quad (5.3)$$

где L – длина здания, м; S – ширина здания, м; l – расстояние от стены здания до молниеотвода, м, (принимается не менее 4 м).

Высота двойного стержневого молниеотвода также не должна превышать 150 м. Горизонтальная проекция зоны защиты двойного стержневого молниеотвода на высоте h_x рассчитывается как зона защиты одиночных стержневых молниеотводов для обоих типов защиты (А, Б) по приведенным выше формулам.

Множественный стержневой молниеотвод предназначен для защиты больших площадей и объектов (рис. 5.2). Зону его защиты определяют как зону защиты попарно взятых соседних молниеотводов.

При установке двойного или множественного молниеотвода высоты h и h_c задаются. Расчетом определяется только расстояние между молниеотводами

$$L = 2\sqrt{(4h - h_c)^2 - 9h^2}. \quad (5.4)$$

Высота h_c не может быть ниже высоты здания.

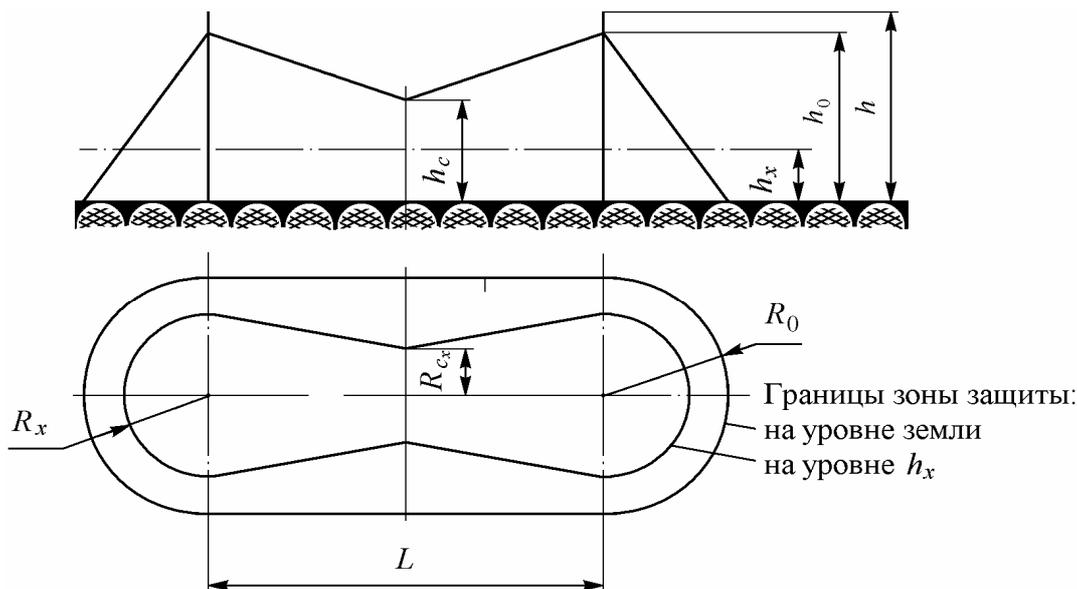


Рис. 5.2. Схема зоны защиты двойного стержневого молниеотвода одинаковой высоты:

h – высота молниеотвода; h_0 – высота зоны защиты; L – расстояние между молниеотводами; R_0 – радиус зоны защиты на поверхности земли; h_c – высота зоны защиты на середине расстояния между молниеотводами

При известных величинах h_c и L высота молниеотвода для зоны Б определяется по формуле

$$h = \frac{h_c + 0,14L}{1,06}. \quad (5.5)$$

Здания и сооружения или их части с производствами, помещения которых по ПУЭ относятся к классам В-I или В-II, должны иметь молниезащиту по первой категории молниезащитных устройств типа А, а помещения с зонами класса В-Iа, В-Iб, В-IIа на местностях со среднегодовой деятельностью 10 ч и более в год должны иметь защиту по II категории. Тип зоны защиты – при ожидаемом количестве поражений молнией в год ≤ 1 – зона Б, больше 1 – зона А.

Наружные технологические установки, открытые склады, относящиеся по ПУЭ к классу В-Iг, должны иметь молниезащиту категории II, зона защиты типа Б.

Порядок расчета молниезащиты.

1. Определить среднюю грозовую деятельность в год в месте нахождения защищаемого объекта. Ориентировочно для Беларуси она составляет: Гродненская, Витебская области, западная и северо-западная части Минской области – от 60 до 80 ч в год; Могилевская, Гомельская, Брестская области, южная и юго-восточная части Минской области – более 80 ч в год.

2. Определить среднее годовое число поражений молнией одного квадратного километра земной поверхности (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1

Интенсивность грозовой деятельности

Интенсивность грозовой деятельности в год, ч	Среднегодовое число ударов молнии на 1 км ² земной поверхности, <i>n</i>
10–20	1
20–40	3
40–60	6
60–80	9
80 и более	12

3. Определить ожидаемое количество поражений молнией в год зданий и сооружений, не оборудованных молниезащитой:

$$N = (S + 6h)(L + 6h)n \cdot 10^{-6}, \quad (5.6)$$

где *S* и *L* – ширина и длина защищаемого объекта, м; *h* – наибольшая высота здания, м; *n* – среднее годовое число ударов молнии на 1 км² земной поверхности.

4. Определить класс защищаемого объекта по ПУЭ (прил. 9).

5. Определить тип зоны защиты и категорию устройства молниезащиты (прил. 12).

6. Найти радиус *R_x* зоны защиты на высоте, равной высоте защищаемого здания (привести схему защищаемого здания и расположение молниеотвода).

7. Определить необходимую высоту одиночного молниеотвода с учетом принятого типа зоны защиты по приведенным ранее формулам.

8. При установке двойного или многократного стержневого молниеотвода по известной высоте защищаемого здания и расстоянию между молниеотводами определить необходимую высоту молниеотвода.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Толщина стенки ограждения в зависимости от ударной нагрузки

Ударная нагрузка, кН	Толщина стенки ограждения, мм	Ударная нагрузка, кН	Толщина стенки ограждения, мм
4,91	1	73,5	10
8,33	2	80,36	11
14,6	3	96,04	12
17,15	4	102,9	13
25,67	5	115,64	14
31,16	6	139,16	15
39,69	7	159,74	16
47,04	8	188,16	17
61,74	9	205,8	18

2. Коэффициент динамической нагрузки k_d для различных машин

Наименование машин, механизмов	Значение k_d
Приводы с асинхронными двигателями	2,5...5
Главный привод токарных станков с асинхронным электродвигателем	1,8...4
Лебедки, строгальные и долбежные станки, скребковые транспортеры, прессы	1,5...2,5
Грузоподъемные машины: механизмы подъема	1,2...2
механизмы передвижения	1,5...4
Вентиляторы	1,4...1,8
Мельницы, смесители	1,8...2,2
Кривошипно-ползунные, эксцентриковые механизмы	1,8...3
Электротранспорт	1,6...2,5

3. Классификация цилиндрических винтовых пружин

Класс пружины	Вид нагрузки	Характер нагружения	Выносливость в циклах, не менее	Соударение витков
I	Сжатие и растяжение	Циклическое	$5 \cdot 10^6$	Отсутствует
II	Сжатие и растяжение	Циклическое и статическое	$1 \cdot 10^5$	Отсутствует
III	Сжатие	Циклическое	$2 \cdot 10^3$	Возможно

4. Разряды одножильных пружин из проволоки круглого сечения

Класс	Разряд	Вид	Сила, вызывающая максимальную деформацию пружины F , Н	Диаметр проволоки, d , мм	Марка стали	Допускаемое напряжение при кручении $[\tau]$, МПа
I	1	Сжатия и растяжения	1...850	0,2...5	65, 70, 75, 65Г, 55ГС	0,3
	2		1...800			
	3		140...600 0	3...12		
	4	Сжатия	280...900 00	14...50	480	
II	1	Сжатия и растяжения	1,5...140 0	0,2...5	65, 70, 75, 65Г, 55ГС	0,5 σ_b
	2		1,25...125 0			
	3		236...100 00	3...12		
	4	Сжатия	$(4,5...100)10^3$	14...50	60С20, 60С2, 65С2ВА, 70С3А, 50ХФА, 65Г	800
III	2	Сжатия	315...140 00	3...12	60С2А, 60С2БА	1350
	3		600 0...200 00	14...25	60С2А, 65С2БА, 70С3А	1050

Примечания: 1. При пульсирующей нагрузке с небольшим числом циклов допускаемое напряжение понижают в 1,25...1,5 раза.

2. Пружины, работающие при переменных напряжениях с большим числом циклов, дополнительно рассчитывают на усталость.

5. Значения поправочного коэффициента k в зависимости от индекса пружины C при расчете пружин растяжения-сжатия с витками круглого сечения

c	4	5	6	8	10	12
k	1,37	1,29	1,24	1,17	1,14	1,11

6. Размеры сечений, мм, призматических шпонок и пазов по ГОСТ 23360

Диаметр вала d	Сечение шпонки		Глубина паза	
	b	h	Вала t_1	Втулки t_2
От 6 до 8	2	2	1,2	1,0
Свыше 8 до 10	3	3	1,8	1,4
Свыше 10 до 12	4	4	2,5	1,8
Свыше 12 до 17	5	5	3	2,3
Свыше 17 до 22	6	6	3,5	2,8
Свыше 22 до 30	8	7	4	3,3
Свыше 30 до 38	10	8	5	3,3
Свыше 38 до 44	12			
Свыше 44 до 50	14	9	5,5	3,8
Свыше 50 до 58	16	10	6	4,3
Свыше 58 до 65	18	11	7	4,4
Свыше 65 до 75	20	12	7,5	4,9
Свыше 75 до 85	22	14	9	5,4
Свыше 85 до 95	25			
Свыше 95 до 110	28	16	10	6,4
Свыше 110 до 130	32	18	11	7,4
Свыше 130 до 150	36	20	12	8,4
Свыше 150 до 170	40	22	13	9,4
Свыше 170 до 200	45	25	15	10,4
Свыше 200 до 230	50	28	17	11,4
Свыше 230 до 260	56	32	20	12,4
Свыше 260 до 290	63			
Свыше 290 до 330	70	36	22	14,4
Свыше 330 до 380	80	40	25	15,4
Свыше 380 до 440	90	45	28	17,4
Свыше 440 до 500	100	50	31	19,5

Примечания: 1. Длина шпонок должна выбираться из ряда: 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 32; 36; 40; 45; 50; 56; 63; 70; 80; 90; 100; 110; 125; 140; 160; 180; 200; 220; 250; 280; 320; 360; 400; 450; 500.

2. Предусматривается три исполнения шпонок: 1 – со скругленными торцами; 2 – с обоими плоскими торцами; 3 – с одним закругленным и одним плоским торцами.

7. Размеры, мм, сегментных шпонок и пазов по ГОСТ 24071

Интервал диаметра вала d	Шпоночный паз			Расчетная длина l
	Размеры шпонки $b \times h \times D$	Глубина паза		
		вала t_1	втулки t_2	
От 3 до 4	1 × 1,4 × 4	1	0,6	3,8
Свыше 4 до 5	1,5 × 2,6 × 7	2	0,8	6,8
Свыше 5 до 6	2 × 2,6 × 7	1,8	1	6,8
Свыше 6 до 7	2 × 3,7 × 10	2,9	1	9,7
Свыше 7 до 8	2,5 × 3,7 × 10	2,7	1,2	9,7
Свыше 8 до 10	3 × 5 × 13	3,8	1,4	12,6
Свыше 10 до 12	3 × 6,5 × 16	5,3	1,4	15,7
Свыше 12 до 14	4 × 6,5 × 16	5	1,8	15,7
Свыше 14 до 16	4 × 7,5 × 19	6	1,8	18,6
Свыше 16 до 18	5 × 6,5 × 16	4,5	2,3	15,7
Свыше 18 до 20	5 × 7,5 × 19	5,5	2,3	18,6
Свыше 20 до 22	5 × 9 × 22	7	2,3	21,6
Свыше 22 до 25	6 × 9 × 22	6,5	2,8	21,6
Свыше 25 до 28	6 × 10 × 25	7,5	2,8	24,5
Свыше 28 до 32	8 × 11 × 28	8	3,3	27,3
Свыше 32 до 38	10 × 13 × 32	10	3,3	31,4

8. Классификация помещений по характеру окружающей среды

1. Нормальное сухое – помещение, в котором отсутствуют признаки, свойственные помещениям жарким, пыльным, с химически активной средой, пожароопасным и взрывоопасным (пп.6–10).

2. Сухое – относительная влажность воздуха в помещении не превышает 60%.

3. Влажное – пары или конденсирующаяся влага выделяются в помещении лишь временно и притом в небольших количествах. Относительная влажность воздуха в помещении более 60%, но не превышает 75%.

4. Сырое – относительная влажность воздуха длительно превышает 75%.

5. Особо сырое – относительная влажность воздуха в помещении близка к 100% (потолок, стены, пол и предметы, находящиеся в помещении, покрыты влагой).

6. Жаркое – температура воздуха в помещении длительно превышает 30°C.

7. Пыльное – по условиям производства в помещении выделяется технологическая пыль в таком количестве, что она может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов и т. п.

8. С химически активной средой – по условиям производства в помещении могут содержаться постоянно или временно пары или образовываться отложения, разрушительно действующие на изоляции и токоведущие части оборудования.

9. Пожароопасное – в котором по условиям производства выделяются пожароопасные пары, газы и пыль в количествах, образующих пожароопасные концентрации (см. прил. 9).

10. Взрывоопасное – в котором по условиям производства выделяются взрывоопасные пары, газы и пыль в количествах, образующих взрывоопасные концентрации (см. прил. 9).

9. Классификация помещений по пожарной и взрывной опасности (по ПУЭ)

Пожароопасные помещения подразделяют на классы:

Класс П-I – помещения, в которых применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки выше 45°C (например, склады минеральных масел, установки по регенерации минеральных масел).

Класс П-II – помещения, в которых выделяются горючие пыль или волокна, переходящие во взвешенное состояние. Возникающая при этом опасность ограничена пожаром (но не взрывом) либо в силу физических свойств пыли или волокон (степени измельчения, влажности и т. п., при которых нижний предел воспламенения составляет 65 г/м³), либо в силу того, что содержание их в воздухе по условиям эксплуатации не достигает взрывоопасных концентраций (например, мало запыленные помещения мельниц, деревообрабатывающие цеха).

Класс П-IIa – производственные и складские помещения, содержащие твердые или волокнистые горючие вещества (дерево, ткани и т. п.), причем признаки, перечисленные для помещений П-II, отсутствуют.

Класс П-III – наружные установки, в которых применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 45°C.

Взрывоопасные помещения (зоны) подразделяют на классы:

Класс В-I – помещения, в которых выделяются горючие газы или пары в таком количестве и с такими свойствами, что они могут образовать с воздухом или другими окислителями взрывоопасные смеси не только при аварийных, но и при нормальных недлительных режимах работы, например при загрузке или разгрузке технологических аппаратов, хранении или переливании ЛВЖ и ГЖ, находящихся в открытых сосудах.

Класс В-Iа – помещения, в которых при нормальной эксплуатации нет взрывоопасных смесей горючих газов и паров с воздухом или другими окислителями, а возможно появление их лишь в результате аварий или неисправностей технологического оборудования.

Класс В-Iб – помещения те же, что и класса В-Iа, но отличаются одной из следующих особенностей: горючие газы в этих помещениях обладают высоким нижним пределом взрываемости (15% и более) и резким запахом при предельно допустимых по санитарным нормам концентрациях (например, машинные залы аммиачных компрессорных и холодильных абсорбционных установок); образование в аварийных случаях в помещениях общей взрывоопасной концентрации по условиям технологического процесса исключается, а возможна лишь местная взрывоопасная концентрация (например, помещения электролиза воды и поваренной соли); горючие газы, ЛВЖ и ГЖ имеются в помещениях в небольших количествах, недостаточных для создания общих взрывоопасных концентраций, и работа с ними производится в вытяжных шкафах или под вытяжными зонтами.

Класс В-Iг – наружные установки (вне помещений), содержащие взрывоопасные газы, пары, ГЖ и ЛВЖ (например, газгольдеры, емкости, сливно-наливные эстакады), где взрывоопасные смеси возможны только в результате аварий или неисправности.

Класс В-II – помещения, в которых выделяются горючие пыли или волокна, переходящие во взвешенное состояние и способные образовать с воздухом и другими окислителями взрывоопасные смеси не только при аварийных, но и при нормальных недлительных режимах работы (например, при нагрузке и разгрузке технологических аппаратов).

Класс В-IIа – помещения, в которых указанные для класса В-II опасные состояния не возникают при нормальной эксплуатации, а возможны только в результате аварий или неисправностей.

10. Выбор проводов в зависимости от окружающей среды

Марка провода и способ прокладки	Характеристика помещения																	
	сухое	влажное	сырое	особо сырое	пыльное	жаркое	химически активной средой	пожароопасные				взрывоопасные						
								П-I	П-II	П-IIa	П-III	В-I	В-Ia	В-Iб	В-Iг	В-II	В-IIa	Наруж- ные ус- тановки
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Проводка открытая на изолирующих опорах																		
АПРД на роликах	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АПР на роликах	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АПР на изоляторах	+	+	+	+	+	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
Голые алюминиевые провода на изоляторах	x	x	x	x	-	+	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x
АТПРФ, АВРГ (в ис- ключительных случа- ях АСРГ или АСРА)	+	x	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	x	-	-	-	-
	-	x	+	+	+	+	+	+	x	x	x	-	x	x	-	-	x	x
АППВ и АПН	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АПР в тонких метал- лоизоляционных тру- бах	+	-	-	-	x	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АПР в тонких метал- лоизоляционных тру- бах	+	-	-	-	x	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АПР и АПРТО в стальных трубах	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	+	+	+	+	+	+	+	+

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Проводка закрытая																		
АППВ и АПН в строительных кон- струкциях или под штукатуркой	+	+	x	-	+	x	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
АПР в изоляционных трубках	x	-	-	-	-	-	x	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-
АПР в каналах строи- тельных конструкций	+	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
АПРТО в стальных трубах	x	x	+	+	x	x	+	x	x	x	+	+	+	+	+	+	+	-

79

Примечания: «+» – рекомендуется; «x» – допускается, если это целесообразно по местным условиям; «-» – запрещается или применение нецелесообразно.

11. Предельно допустимый ток I, А, для проводов и кабелей в зданиях и на открытом воздухе

Сече- ние, мм ²	Провода и шнуры с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией								Провода и кабели, изолированные и защищенные оболочками, (не)бронированные			
	медные: ПР, ПРГ, ПРД, ШР, ПВ, ПРТО, ППВ и др.				алюминиевые: АПР, АПВ, АПРТО, АППВ и др.				медные: ТПРФ, СРГ, ВРГ, НРГ, ПРП, ВВГ, ВРБ и др.		алюминиевые: АТПРФ, АВРГ, АНРГ, АТРГ, АВВГ и др.	
	при прокладке								двухжиль- ные	трехжиль- ные	двухжиль- ные	трехжиль- ные
	от- крыто	в трубах при числе одножильных проводов			от- крыто	в трубах при числе одножильных проводов						
2		3	4	2		3	4					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	17	16	15	14	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5	23	19	17	16	–	–	–	–	19	19	–	–
2,5	30	27	25	25	24	20	19	19	27	25	21	19
4	41	38	35	30	32	28	28	28	28	35	29	27
6	50	46	42	40	39	36	32	30	50	42	38	32
10	80	70	60	50	60	50	47	39	70	55	55	42
16	100	85	80	75	75	60	60	55	90	75	70	60
25	140	115	100	90	105	85	80	70	115	95	90	75
35	170	135	125	115	130	100	95	85	140	120	105	90
50	215	185	170	150	165	140	130	120	175	145	135	110
70	270	225	210	185	210	175	165	140	215	180	165	140
95	330	275	255	225	255	215	200	175	260	220	200	170
120	385	315	290	260	295	245	220	200	300	260	230	200
160	440	360	330	–	340	275	255	–	350	305	270	235
185	510	–	–	–	390	–	–	–	405	350	310	270

Сече- ние, мм ²	Шланговые провода и кабели		Кабели с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке						Голые провода	
	медные: ШРПД, ШРПС, КРПТ		медные: СГ, СБГ, АБГ и др.			алюминиевые: ААГ, ААБГ и др.			медные	алюми- ниевые
	двух- жиль ные	трех- жиль ные	двух- жиль ные	трех- жиль ные	четырёх жиль ные	двух- жиль ные	трех- жиль ные	четырёх жиль ные		
1	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	18	16	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5	23	20	–	–	–	–	–	–	–	–
2,5	33	28	30	28	–	23	22	–	–	–
4	43	36	40	37	35	31	29	27	50/25	–
6	55	45	55	45	45	42	35	35	70/35	–
10	75	60	75	60	60	55	46	45	95/60	–
16	95	80	95	80	80	75	60	60	130/100	105/75
25	125	106	130	105	100	100	80	75	180/135	135/105
35	150	130	150	125	120	115	95	95	220/170	170/130
50	185	160	185	155	145	140	120	110	270/215	215/165
70	235	200	225	200	185	175	155	140	340/270	265/210
95	–	–	275	245	215	210	190	165	415/335	320/255
120	–	–	320	285	260	245	220	200	485/395	375/300
160	–	–	375	330	300	290	255	230	570/465	440/355
185	–	–	–	375	340	–	290	260	640/530	500/410

12. Тип зоны защиты и категория устройств молниезащиты

Здания и сооружения	Местоположение	Тип зоны защиты	Категория устройств молниезащиты
1. Здания и сооружения, относящиеся по ПУЭ к классам В-I и В-II	По всей территории	Зона А	I
2. Здания и сооружения, относящиеся по ПУЭ к классам В-I и В-II	В местах со среднегодовой грозовой деятельностью 10 ч и более	При $N \leq 1$ зона Б, при $N > 1$ зона А	II
3. Наружные установки и открытые склады, относящиеся по ПУЭ к классу В-Iг	На всей территории	Зона Б	II
4. Здания и сооружения, относящиеся по ПУЭ к классу II-I, II-II и II-IIIа	В местах со среднегодовой грозовой деятельностью 20 ч и более	При $N \leq 2$ зона Б, при $N > 2$ зона А	III
5. Наружные установки и открытые склады, относящиеся по ПУЭ к классу II-III	То же	Зона Б	III
6. Здания и сооружения III, IV, V степеней огнестойкости и по ПУЭ непожаро-невзрывоопасные	В местах со среднегодовой грозовой деятельностью 20 ч и более	Зона Б	III
7. Дымовые трубы, водонапорные башни, вышки высотой 15 м и более	В местах с грозовой деятельностью 10 ч и более	Зона Б	III
8. Здания, возвышающиеся на 25 м над высотой окружающих зданий в радиусе 400 м, отдельно стоящие здания высотой более 30 м, удаленные от других зданий более чем на 400 м	В местностях со среднегодовой грозовой деятельностью 20 ч и более	Зона Б	III
9. Общественные здания III, IV, V степеней огнестойкости (спальные корпуса, клубы, детские сады и др.)	То же	Зона Б	III

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборудование производственное. Общие требования безопасности: ГОСТ 2.2.003. ССБТ. –М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87. – М., 1988.
3. Курдюмов, В. И. Проектирование и расчет средств обеспечения безопасности / Курдюмов, В. И., Зотов, Б. И. –М.: КолосС, 2005.
4. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В. И. Анурьев – 8-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 2001. – 3 т.
5. Расчет деталей машин: справ. пособие / А. В. Кузьмин [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. –Минск: Вышш. шк., 1986.
6. Машиностроение: энциклопедия / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) [и др.] – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 4. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка.
7. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: в 3 т. / А. С. Тимонин. – Калуга: Изд. И. Бочкаревой, 2002. – 3 т.
8. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Минск: Асобны дах, 2005.
9. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник / А. С. Тимонин. –Калуга: Изд. И. Бочкаревой, 2003.
10. Долин, П. А. Справочник по технике безопасности / П. А. Долин. – 4-е изд., перераб. –М.: Энергия, 1973.
11. Охрана труда / под ред. проф. Б. А. Князевского. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Вышш. шк., 1982.
12. Кораблев, В. П. Меры электробезопасности в химической промышленности / В. П. Кораблев. –М.: Химия, 1983.
13. Правила устройства электроустановок. –М.: Энергоатомиздат, 1986.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. РАСЧЕТ ОПАСНЫХ ЗОН И УСТРОЙСТВ БЕЗОПАСНОСТИ.....	4
1.1. Общие положения	4
1.2. Методика расчета опасных зон	6
1.3. Методика расчета ограждений	8
1.4. Методика расчета предохранительных муфт.....	9
1.5. Методика и последовательность расчета шпоночных соединений	14
2. РАСЧЕТ СОСУДОВ И АППАРАТОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	16
2.1. Общие положения и порядок расчета.....	16
2.2. Предохранительные клапаны	20
2.3. Предохранительные мембраны.....	27
2.4. Теплоизоляция	30
3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	33
3.1. Общие положения	33
3.2. Методика расчета сечения проводов и их выбора в зависимости от окружающей среды.....	34
4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ	35
4.1. Общие положения	35
4.2. Методика и порядок расчета вертикального заземляющего устройства	42
4.3. Методика и порядок расчета горизонтального заземляющего устройства	59
4.4. Методика и порядок расчета заземляющего устройства с использованием естественного заземления	61
4.5. Методика и порядок расчета зануления	63

5. МОЛНИЕЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	67
5.1. Общие положения	67
5.2. Методика расчета молниезащиты.....	68

Приложения

1. Толщина стенки ограждения в зависимости от ударной нагрузки.....	72
2. Коэффициент динамической нагрузки k_d для различных машин	72
3. Классификация цилиндрических винтовых пружин	72
4. Разряды одножильных пружин из проволоки круглого сечения	73
5. Значения поправочного коэффициента k при расчете пружин растяжения-сжатия с витками круглого сечения	74
6. Размеры сечений, мм, призматических шпонок и пазов по ГОСТ 23360.....	74
7. Размеры, мм, сегментных шпонок и пазов по ГОСТ 24071	75
8. Классификация помещений по характеру окружающей среды	75
9. Классификация помещений по пожарной и взрывной опасности (по ПУЭ)	76
10. Выбор проводов в зависимости от окружающей среды.....	78
11. Предельно допустимый ток I , А, для проводов и кабелей в зданиях и на открытом воздухе	80
12. Тип зоны защиты и категория устройств молниезащиты.....	82
 Литература	 83

Учебное издание

Ладик Борис Родионович
Сацура Валентин Михайлович
Ермак Иван Тимофеевич
Челноков Александр Антонович

**ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ОХРАНЕ ТРУДА
И ТЕХНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *И.О. Гордейчик*
Компьютерная верстка *Е.В. Ильченко*

Подписано в печать 10.05.2007. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 5,2.
Тираж 800 экз. Заказ 271.

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050. Минск, Свердлова, 13.
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.