

Лекция 14. Электробезопасность. **Пожарная безопасность.**

14.1. Электробезопасность

Действие электрического тока на человека

Промышленность является важнейшим пользователем электрической энергии самых разнообразных параметров и видов (по частоте, напряжению, силе тока и т. д.). Негативной стороной этого факта стала возможность травмирующего действия электрического тока на организм человека со всеми вытекающими последствиями. Действие электрического тока на человека носит многообразный характер.

Проходя через организм человека, электрический ток вызывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве кровеносных сосудов, нервов, крови. Электролитическое действие тока проявляется в разложении органических жидкостей тела (воды, крови) и нарушениях их физико-химического состава. Биологическое действие тока проявляется как раздражение и возбуждение живых тканей организма и сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц (сердца, лёгких). Эти действия приводят к двум видам поражения: электрическим травмам и электрическим ударам.

Электрические травмы представляют собой чётко выраженные местные повреждения тканей организма, вызванные воздействием электрического тока (или дуги). Электротравмы в большинстве случаев излечимы, хотя степень тяжести может быть значительной, вплоть до гибели человека. Различают следующие электрические травмы: электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, электрофтальмия и механические повреждения.

Электрический ожог возникает при значительных напряжениях и несовершенном контакте человека с токоведущими частями. При совершенном контакте возникают электрические знаки – чётко очерченные пятна серого или бледно-жёлтого цвета на поверхности кожи человека, напоминающие мозоли. Металлизация кожи – это проникновение в верхние слои кожи мельчайших частичек металла, графита. Болезненность вызывается нагретостью этих частичек. Электрофтальмия – поражение глаз, вызванное интенсивным излучением электрической дуги (вредны ультрафиолетовые и инфракрасные лучи). Механические повреждения возникают в результате резких непроизвольных судорожных сокращений мышц, вплоть до разрывов кожи, кровеносных сосудов, вывихов суставов и

перелома костей. Возможны вторичные последствия, вызванные падением с высоты, произвольными ударами.

Электрический удар – это возбуждение внутренних живых тканей организма проходящим через него электрическим током, сопровождающееся произвольными судорожными сокращениями мышц. Если последние принадлежат органам дыхания или особенно сердцу, тяжёлые последствия (клиническая, биологическая смерть) возможны из-за прекращения работы дыхания, сердцебиения и наступления электрического шока.

Факторы, определяющие опасность поражения электрическим током. Характер и последствия воздействия на человека электрического тока зависят от следующих факторов:

- электрического сопротивления тела человека;
- величины напряжения и тока;
- продолжительности воздействия электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- рода и частоты электрического тока;
- условий внешней среды.

Электрическое сопротивление току оказывает в основном кожа, а в её составе – наружный роговой слой. В сухом состоянии – это диэлектрик с объемным удельным сопротивлением до 10^5 Ом·м. Сопротивление внутренних (влажных) тканей в тысячи раз меньше, порядка 300...500 Ом. В качестве расчётной величины при переменном токе промышленной частоты применяют активное сопротивление тела человека, равное 1 000 Ом. Повреждение рогового слоя (порезы, царапины, ссадины) снижают сопротивление тела до 500...700 Ом, что пропорционально увеличивает опасность поражения человека током. Такое же негативное значение имеет увлажнение кожи и окружающих предметов (ещё хуже электролитами) при повышенной температуре, вызывающей усиленное потовыделение. По вышеуказанным причинам фактором, усугубляющим действие электрического тока, является загрязнённость кожи. Важна площадь контакта и конкретное место токоприложения. Наименьшим сопротивлением обладает кожа лица, шеи, подмышек и, наоборот, кожа ладоней, подошв имеет повышенное сопротивление. С увеличением времени действия напряжения, силы тока и частоты сопротивление кожи резко падает, что усугубляет последствия прохождения тока через организм человека.

Величина тока и напряжения. Основным фактором, обуславливающим исход поражения электрическим током, является сила тока, проходящего через тело человека. Напряжение, приложенное к телу человека, также влияет на исход поражения, но лишь постольку, поскольку оно определяет значение тока, проходящего через человека. Различают:

- осязаемый ток – вызывает осязаемые раздражения ($\infty 1 \text{ мА} \dots 5 \text{ мА}$);
- неотпускающий ток – вызывает непреодолимое судорожное сокращение мышц руки, в которой зажат проводник ($\infty 15 \text{ мА} \dots 50 \text{ мА}$);
- фибрилляционный ток – вызывает фибрилляцию (трепетание) сердечной мышцы ($\infty 100 \text{ мА} \dots 300 \text{ мА}$);
- ток больше 5 А фибрилляцию сердца не вызывает, наступает мгновенная остановка сердца.

Продолжительность воздействия электрического тока. Существенное влияние на исход поражения оказывает длительность прохождения тока через тело человека. Продолжительное действие тока приводит к тяжёлым, а иногда смертельным поражениям. Влияние длительности прохождения тока через тело человека на исход поражения можно оценить формулой

$$J_h = 50/t,$$

где I_h – ток, проходящий через тело человека, мА;

t – продолжительность прохождения тока, с.

Указанное следует из факта, что с увеличением времени прохождения тока сопротивление тела человека падает, так как при этом усиливается местный нагрев кожи, что приводит к расширению её сосудов, к усилению снабжения этого участка кровью и увеличению потовыделения.

Путь тока через тело человека. Путь прохождения тока через тело человека играет существенную роль в исходе поражения, так как ток может пройти через жизненно важные органы: сердце, лёгкие, головной мозг. Влияние пути тока на исход поражения определяется также сопротивлением кожи на различных участках тела. Возможные петли тока: рука – рука, рука – ноги и нога – нога. Наиболее опасны петли голова – руки и голова – ноги, так как при этом поражаются органы дыхания и сердце.

Род и частота электрического тока. Переменный ток в 4...5 раз опаснее постоянного. Это вытекает из сопоставления пороговых осязаемых, а также неотпускающих токов для переменного и постоянного токов. Случаев поражения в электроустановках постоянным током в несколько раз меньше, чем в аналогичных установках переменного тока. Это положение справедливо лишь для напряжений до 250...300 В. При более высоких напряжениях постоянный ток более опасен, чем переменный (интенсивный электролиз). Для переменного тока играет роль также и его частота. С увеличением частоты переменного тока полное сопротивление тела уменьшается, что приводит к увеличению тока, проходящего через человека, а следовательно, повышается опасность поражения. Наибольшую опасность представляет ток с частотой от 50 до 1 000 Гц; при дальнейшем повышении

частоты опасность поражения уменьшается и полностью исчезает при частоте 45...50 кГц. Эти токи сохраняют опасность ожогов. Снижение опасности поражения током с ростом частоты становится практически заметным при 1...2 кГц.

Индивидуальные свойства человека. Установлено, что физически здоровые и крепкие люди легче переносят электрические удары. Повышенной восприимчивостью к электрическому току отличаются лица, страдающие болезнями кожи, сердечно-сосудистой системы, органов внутренней секреции, лёгких, нервными болезнями. Правилами ТБ при эксплуатации электроустановок предусмотрен отбор персонала для обслуживания действующих электроустановок по состоянию здоровья. С этой целью проводится медицинское освидетельствование лиц при поступлении на работу и периодически (1 раз в два года) – в соответствии со списком болезней и расстройств, препятствующих допуску к обслуживанию действующих электроустановок.

Условия внешней среды. Состояние окружающей воздушной и макроматериальной сред существенным образом влияет на опасность поражения током. Сырость, токопроводящая пыль, едкие пары и газы, разрушающе действующие на изоляцию электроустановок, а также высокая температура окружающего воздуха понижают электрическое сопротивление тела человека, что ещё больше увеличивает опасность поражения его током. Воздействие тока на человека усугубляют также токопроводящие полы и близко расположенные к электрооборудованию металлические конструкции, имеющие связь с землёй, так как в случае одновременного касания к этим предметам и корпусу электрооборудования, случайно оказавшемуся под напряжением, через человека пройдёт ток опасной величины. В зависимости от наличия перечисленных условий, повышающих опасность воздействия тока на человека, «Правила устройства электроустановок» делят все помещения по опасности поражения людей электрическим током на следующие классы: без повышенной опасности, с повышенной опасностью, особо опасные, а также территории размещения наружных электроустановок.

Помещения без повышенной опасности характеризуются отсутствием условий, создающих повышенную или особую опасность.

Помещения с повышенной опасностью характеризуются наличием в них одного из следующих условий: сырость, превышающая 75 %, или токопроводящая пыль; токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные); высокая температура (выше + 35 °С); возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землёй металлоконструкциям зданий, технологических аппаратов и механизмов, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

Особо опасные помещения характеризуются наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность: особая сырость – 100 %, потолок, стены, пол и предметы в помещении покрыты влагой; химически активная или органическая среда, разрушающая изоляцию и токоведущие части электрооборудования; одновременная реализация двух и более условий повышенной опасности.

Территории размещения наружных электроустановок. По опасности поражения людей электрическим током эти территории приравниваются к особо опасным помещениям.

Большинство производственных помещений являются особо опасными. Электрооборудование следует выбирать с учётом состояния окружающей среды и класса помещения по опасности поражения током, чтобы обеспечить необходимую степень безопасности при его обслуживании. Электрическое оборудование, устанавливаемое в сырых, особо сырых и пыльных помещениях, а также в помещениях с химически активной средой, должно быть закрытого типа и иметь соответствующее исполнение: капле- или брызгозащищённое, пыленепроницаемое, продуваемое. Электрооборудование и электрические сети, размещаемые в помещениях с химически активной средой, должны выбираться с учётом соответствующего исполнения или покрытия, обеспечивающего защиту их от воздействия этой среды. При выборе мест прокладки электрических сетей и способов защиты их от коррозии следует учитывать свойства окружающей среды. В условиях воздействия химически активных сред следует применять электрооборудование химически стойкого исполнения (лакокрасочные или гальванические покрытия). Во взрывоопасных зонах всех классов с химически активными средами должны применяться провода и кабели с поливинилхлоридной изоляцией, а также провода с резиновой изоляцией и кабели с резиновой и бумажной изоляцией в свинцовой или поливинилхлоридной оболочке. Применение проводов и кабелей с полиэтиленовой изоляцией при любых оболочках и покрытиях запрещается. Конструкция вводных устройств электрооборудования должна обеспечивать защиту токоведущих частей, изоляции и мест соединений от воздействия химически активных сред, для которых оно предназначено.

Критерии безопасности электрического тока. При проектировании, расчёте и эксплуатационном контроле защитных систем руководствуются безопасными значениями тока при данном пути его протекания и длительности воздействия в соответствии с ГОСТ 12.1.038–82. При длительном воздействии допустимый безопасный ток принят в 1 мА. При продолжительности воздействия до 30 с – 6 мА. Для ещё меньших времён:

длительность воздействия, с 1,0 0,7 0,5 0,2

ток, mA 50 70 100 250

Эти токи считаются допустимыми для наиболее вероятных путей их протекания в теле человека: рука – рука, рука – ноги, нога – нога.

Анализ опасности поражения электрическим током в различных сетях.

Поражение человека электротоком возможно лишь при его непосредственном контакте с точками электроустановки, между которыми существует напряжение, или с точкой, потенциал которой отличается от потенциала земли. Анализ опасности такого прикосновения, оцениваемой величиной проходящего через человека тока или напряжением прикосновения, зависит от ряда факторов: схемы включения человека в электросеть, её напряжения, режима нейтрали, изоляции токоведущих частей, их ёмкостной составляющей.

При изучении причин поражения током необходимо различать прямой контакт с токоведущими частями электроустановок и косвенный. Первый, как правило, возникает при грубейших нарушениях правил эксплуатации электроустановок (ПТЭ и ПТБ), второй – в результате аварийных ситуаций, например, при пробое изоляции. Схемы включения человека в электрическую цепь могут быть различными. Однако наиболее распространёнными являются две: между двумя различными проводниками – двухфазное включение и между одним проводником или корпусом электроустановки, одна фаза которой пробита, и землёй – однофазное включение. Статистика показывает, что наибольшее число электротравм происходит при однофазном включении, причём большинство из них – в сетях напряжением 380/220 В. Двухфазное включение является более опасным, поскольку в данном случае человек находится под линейным напряжением и величина тока почти в два (1,73) раза превышает ток однофазного подключения. При двухфазном включении ток, проходящий через тело человека, не уменьшается при изолировании человека от земли с использованием диэлектрических галош, бот, ковриков, полов. При однофазном же включении человека в сеть сила тока во многом определяется режимом нейтрали. В сетях с изолированной нейтралью опасность поражения человека током тем меньше, чем меньше ёмкостная и выше активная составляющая фазных проводов относительно земли. Если ёмкостная составляющая велика, то высокое сопротивление изоляции фаз не обеспечивает необходимой защиты. В трёхфазных четырёхпроводных сетях с глухо заземлённой нейтралью, проводимость изоляции и ёмкостная проводимость фазных проводов которых относительно земли малы и ими можно пренебречь, сила тока через человека не может превысить нормируемого значения.

Таким образом, прикосновение человека к фазе трёхфазной сети с глухо заземлённой нейтралью или к корпусу электрооборудования, у которого

пробита фаза, в период нормальной работы более опасно, чем прикосновение в сети с изолированной нейтралью, но менее опасно, чем контакт с фазой или корпусом электрооборудования в сети с изолированной нейтралью в аварийной ситуации. Замыкание на землю всегда сопровождается растеканием тока в грунте, что приводит к возникновению нового вида поражения человека, а именно попадание под напряжение прикосновения и напряжение шага. Такое замыкание может быть случайным или преднамеренным. В последнем случае проводник, находящийся в контакте с землёй, называется *заземлителем*, или *электродом*. В объёме земли, где проходит ток, возникает так называемое «поле растекания тока». Теоретически оно простирается до бесконечности, однако в реальных условиях уже на расстоянии 20 м от заземлителя плотность тока растекания и потенциал практически равны нулю. Опасность нахождения человека в зоне растекания тока определяется напряжением шага, т. е. напряжением между двумя точками земли в зоне растекания тока. Выбор схемы сети, а следовательно и режима работы нейтрали для реального производства осуществляют, исходя из рабочего напряжения, протяжённости сети, числа подключённых потребителей и других технологических требований с обязательным учётом условий безопасности. Для установок, работающих при напряжении до 1 000 В и получивших наибольшее распространение в производстве и быту, по технологическим соображениям предпочтение отдаётся четырёхпроводной трёхфазной сети с глухо заземлённой нейтралью, поскольку она позволяет использовать два рабочих напряжения: $U_{\text{л}} - U_{\text{ф}}$. Если не исключена возможность контакта с токоведущими частями электрооборудования, то при нормальной работе более безопасна сеть с изолированной нейтралью, а при аварийной ситуации – сеть с глухо заземлённой нейтралью. Поэтому сети с изолированной нейтралью следует использовать только в тех случаях, когда они мало разветвлены, и лишь для сухих беспыльных помещений без агрессивной среды, в которых сохраняются высокий уровень изоляции и малая ёмкость относительно земли. Такие сети должны находиться под постоянным контролем квалифицированного персонала. Электроустановки с рабочим напряжением выше 1000 В представляют значительную опасность при прикосновении к фазе, независимо от режима нейтрали. Поэтому для предотвращения поражения током необходимо исключить возможность не только касания, но и приближения на опасное расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением, поскольку может возникнуть искровой разряд, переходящий затем в электрическую дугу. В электроустановках напряжением до 35 кВ нейтраль или совсем не заземляют, или заземляют через реактивную катушку, что обусловлено надёжностью и экономичностью эксплуатации; при напряжении выше 35 кВ применяют только глухо заземлённую нейтраль, что также обусловлено технологическими соображениями.

Защитные меры в электроустановках. В соответствии с ГОСТ 12.2.007.0–75 «Изделия электротехнические» все действующее на предприятии или

вновь устанавливаемое электрооборудование по способу защиты человека от поражения током подразделяются на пять классов защиты: 0, 0I, I, II, III. К классу 0 относится электрооборудование, которое имеет рабочую изоляцию, но не имеет элементов для заземления, если это оборудование не отнесено к классам II и III. К классу 0I относится электрооборудование, имеющее рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания. К классу I относится электрооборудование, которое, в отличие от электрооборудования класса 0I, в проводе для присоединения к источнику питания имеет заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом. К классу II относится электротехническое оборудование, имеющее двойную или усиленную изоляцию, но не имеющее элементов для заземления. К классу III относится электрооборудование, которое не имеет ни внешних, ни внутренних электрических цепей напряжением выше 50 В.

В соответствии с этой классификацией в качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть приведены следующие:

- изоляция токоведущих частей;
- малое напряжение в электрических цепях;
- защитное заземление, зануление, защитное отключение;
- применение разделяющих трансформаторов;
- использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;
- защитные средства и предохранительные приспособления.

Изоляция токоведущих частей с использованием диэлектрических материалов является основным методом защиты от поражения электрическим током. Поэтому качество изоляции имеет важное значение, особенно для сетей с изолированной нейтралью напряжением до 1 000 В, поскольку при $U > 1\,000$ В любое снижение $R_{из}$ всегда приводит к глухому замыканию на землю и автоматическому отключению сети. Только для изделий, работающих при $U < 12$ В переменного и $U < 50$ В постоянного тока, величины электрической прочности изоляции и её сопротивление не регламентируются. Покрытие токоведущих частей лаком, эмалью или аналогичными материалами не является достаточным для защиты при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям. В соответствии с ПУЭ для электроизоляции токоведущих частей, работающих при напряжении до 1000 В, $R_{из}$ не должно быть менее 0,5 МОм. Для вторичных цепей $R_{из} > 1$ МОм, для сетей с $U > 1\,000$ В сопротивление изоляции не должно быть менее 10 МОм. Сопротивление изоляции периодически контролируется: в помещениях без повышенной опасности – раз в год, а в помещениях с повышенной опасностью – два раза в год. Для этого

используются приборы – мегаомметры. В особо опасных помещениях и для контроля изоляции сетей с изолированной нейтралью регламентируется постоянный контроль аппаратурой, работающей на оперативном токе. В зависимости от функционального назначения проводников применяется различная окраска изоляции. Качественно другим шагом повышения надёжности изоляции является двойная изоляция, состоящая из рабочей изоляции на токоведущих частях и слоя изоляции из полимерных материалов на тех металлических частях электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением в случае пробоя. В последнее время достижения в производстве полимерных материалов позволили изготавливать корпуса электрооборудования из пластмассовых веществ.

Применение малых напряжений позволяет резко уменьшить опасность во всех случаях. В соответствии с ПУЭ безопасным является переменное напряжение менее 50 В и постоянное менее 110 В. Малые напряжения применяют как в помещениях с повышенной опасностью, так и в особо опасных для питания ручного электроинструмента, светильников стационарного местного освещения, переносных ламп, т. е. в тех случаях, когда возможен длительный контакт с корпусом электрооборудования. Источниками малого напряжения являются трансформаторы, батареи гальванических элементов, аккумуляторы, выпрямительные установки. Применение автотрансформаторов для этих целей запрещено, поскольку первичная и вторичная обмотки электрически связаны между собой. Для предотвращения перехода высокого напряжения с первичной обмотки на вторичную и повышения безопасности работ с понижающим трансформатором необходимо заземлить или занулить корпус и вторичную обмотку. Между обмотками трансформатора должна быть двойная изоляция. Для повышения безопасности работ с малым напряжением конструкции вилок и штепсельных розеток должны отличаться от подобных для электроустановок, работающих при $U > 50$ В. Широкое применение малых напряжений как эффективной меры защиты затруднено из-за необходимости создания протяжённых сетей и мощных электроприёмников малого напряжения, поскольку для достижения соответствующей мощности необходимо резко увеличить силу тока, что экономически не выгодно.

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землёй или её эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением при нарушении изоляции электроустановки. Назначение защитного заземления – превращение «замыкания на корпус» в «замыкание на землю», с тем чтобы уменьшить напряжение прикосновения и напряжение шага до безопасных величин (выравнивание потенциала). При наличии защитного заземления сопротивление замкнутой на корпус фазы определяется в основном сопротивлением заземляющего устройства R_3 . Заземляющее устройство состоит из металлического заземлителя, непосредственно соприкасающегося с землёй, и заземляющих проводников.

Сопротивление заземлителя складывается из сопротивления растеканию тока заземлителя и сопротивления заземляющих проводников. При $U > 1\ 000\ В$ заземление используется в любых сетях, независимо от режима нейтрали. По расположению относительно корпусов электрооборудования различают два вида заземления: выносное (или сосредоточенное) и контурное (или распределённое). При выносном заземлении заземлитель вынесен за пределы площадки, на которой находится электрооборудование. Это даёт возможность выбрать место с наименьшим сопротивлением грунта для размещения заземлителя. Более распространено контурное заземление, характеризующееся тем, что его одиночные заземлители размещены по контуру (периметру) площадки, на которой расположено электрооборудование. Внутри производственных помещений выравнивание потенциала происходит естественным образом через металлические конструкции здания, трубопроводы и другие проводящие устройства, имеющие электрическую связь с разветвлённой сетью заземления. Основным элементом заземляющего устройства является заземлитель, который может быть естественным или искусственным. Естественные заземлители – это электропроводящие части жидкостей и газов, трубопроводов, покрытых изоляцией для защиты от коррозии, свинцовых оболочек кабелей. Искусственные заземлители – это вбитые или закопанные в землю электроды, например: стальные трубы, угловая сталь, полосовая сталь, стальные прутки. В качестве заземляющих проводников, соединяющих заземляемые части электроустановок с заземлителем, применяют медные, алюминиевые проводники или полосовую сталь. Заземляющие проводники прокладывают открыто, с хорошим доступом для осмотра. Не допускается последовательное включение заземлённого оборудования. Согласно требованиям ГОСТ 12.1.030–81 сопротивление заземляющего устройства нормируют, оно не должно превышать:

10 Ом – в стационарных сетях напряжением до 1 000 В;

4 Ом – в стационарных сетях в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных напряжением до 1 000 В;

0,5 Ом – в установках напряжением выше 1 000 В.

Зануление – преднамеренное присоединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, но которые вследствие повреждения изоляции могут оказаться под напряжением, к многократно заземлённому нулевому проводу. Данный метод защиты используют только в четырёхпроводных сетях напряжением до 1 000 В с глухозаземлённой нейтралью. Это связано с тем, что сила тока замыкания на землю в таких сетях велика, и при обычном сопротивлении заземления через человека может проходить ток большой силы. Цель заземления нейтрали – снизить до безопасного значения напряжения относительно земли нулевого провода и

всех, присоединённых к нему корпусов электроустановок при случайном замыкании фазы на землю. Принцип зануления заключается в превращении случайного пробоя фазы на корпус в короткое однофазное замыкание, т. е. замыкание между фазным и нулевым проводом. Большой силы ток неизбежно вызовет срабатывание защиты, и установка автоматически отключится от сети. В качестве защиты используют плавкие предохранители или автоматические выключатели с тепловыми реле. Для уменьшения опасности поражения людей током, в случае обрыва нулевого провода и замыкания фазы на корпус, за местом обрыва необходимо, в соответствии с ПУЭ, повторно заземлять нулевой провод, иначе присоединённые после места обрыва к нулевому проводу корпуса электроустановок окажутся под фазным напряжением. Согласно ПУЭ сопротивление повторного заземления нулевого провода не должно превышать 10 Ом. При обрыве нулевого провода система зануления превращается в систему заземления. Занулению подлежат те же металлические нетоковедущие части электрооборудования, что и при заземлении (корпуса электроустановок, трансформаторов, аппаратов, светильников, приводы электрических машин, каркасы распределительных щитов, оболочки кабелей). Для замера сопротивления зануления можно использовать любой прибор для измерения малых сопротивлений.

Защитное отключение – быстродействующая защита (не более 0,2 с), обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки или участка электрической сети при возникновении опасности поражения человека током, в частности, при пробое фазы на корпус, снижении сопротивления изоляции фаз относительно земли, появлении в сети более высокого напряжения. Принцип работы защитно-отключающих устройств состоит в том, что устройство постоянно контролирует величину входного сигнала (напряжение корпуса относительно земли, силу тока замыкания на землю, напряжение фаз относительно земли, напряжение нулевой последовательности) и сравнивает его с установленным значением. Если входной сигнал отличается от установки в худшую сторону, то устройство срабатывает. Все устройства включают в себя следующие элементы:

- датчик – чувствительный элемент, воспринимающий входной сигнал;
- преобразователь – для преобразования и усиления входного сигнала, поступающего с датчика;
- автоматический выключатель – исполнительный орган, отключающий электроустановку или участок сети при поступлении аварийного сигнала.

Защитное разделение сетей – подключение отдельных потребителей через разделяющие трансформаторы с коэффициентом трансформации 1:1. Применяется в сильно разветвлённых сетях, имеющих значительную ёмкость, а исправную изоляцию – небольшого сопротивления. Особенно это

важно при работе на открытых площадках, в металлических резервуарах и аппаратах. Согласно ПУЭ разделяющие трансформаторы применяют в установках напряжением до 1 000 В, причём вторичное напряжение трансформаторов не должно превышать 380 В. Запрещается в этом случае заземлять вторичную обмотку, как это делается в понижающих трансформаторах, поскольку потребитель подсоединяется к сети с изолированной нейтралью.

Предохранительные устройства защищают человека от поражения электрическим током недоступностью при случайных прикосновениях к токоведущим частям (метод недоступности). Это достигается применением различных оболочек, ограждений и блокировок. Особенно это важно в электроустановках напряжением выше 1 000 В, так как в этом случае опасно даже приближение к токоведущим частям, независимо от того, изолированы они или нет. Сплошные ограждения в виде кожухов и крышек (оболочки) применяют в электроустановках напряжением до 1 000 В, сетчатые (25×25 мм) – при напряжении выше 1 000 В. Сетчатые ограждения должны иметь двери, запираемые на замок и снабжённые электрическими или механическими блокировками. Блокировки также используют в рубильниках, пускателях, автоматических выключателях, работающих в условиях с повышенными требованиями к безопасности.

Защита высотой – расположение токоведущих частей на недоступной высоте или в недоступном месте также позволяет обеспечить определённую безопасность без применения ограждений. При этом обязательно следует учитывать возможность случайного прикосновения к токоведущим частям длинными предметами, которые человек может держать в руках. Обеспечению электробезопасности человека способствует также окраска отдельных частей электроустановок в соответствии с ГОСТ 12.4.026–76 «Цвета сигнальные и знаки безопасности». Так, внутренние поверхности шкафов, ниш и пультов управления, в которых имеются электрические аппараты, работающие при напряжении выше 50 В, должны быть окрашены в красный цвет. Однако окраска не является методом защиты, она используется в дополнение к рассмотренным способам защиты.

Индивидуальные защитные средства играют важную роль в обеспечении безопасности электротехнического персонала. К ним относятся:

- штанги изолирующие (оперативные, измерительные), клещи изолирующие и электроизмерительные, указатели напряжения;
- изолирующие средства для ремонтных работ под напряжением выше 1000 В;
- диэлектрические перчатки, боты, галоши, коврики, изолирующие подставки;
- слесарно-монтажный инструмент с изолированными рукоятками;

- переносные заземления (закоротки);
- временные ограждения, предупредительные плакаты;
- защитные очки, предохранительные пояса, канаты.

По назначению все средства защиты подразделяются на основные (первые четыре пункта) и дополнительные (все остальные). Основные средства способны длительное время выдерживать рабочее напряжение электроустановки, поэтому ими можно касаться открытых токоведущих частей, находящихся под напряжением. Например, в установках напряжением до 1 000 В к основным средствам защиты относятся диэлектрические перчатки, инструмент с изолированными ручками, указатели напряжения; в электроустановках напряжением выше 1 000 В – изолирующие штанги, клещи, указатели высокого напряжения. Дополнительные средства, не обладая достаточной электрической прочностью, только усиливают защитное действие основных средств. Так, в электроустановках напряжением до 1 000 В к ним относятся диэлектрические галоши, коврики, изолирующие подставки, а напряжением выше 1 000 В – диэлектрические перчатки, боты, подставки и коврики.

Статическое электричество. Широкое применение в промышленности диэлектрических материалов и органических соединений (полимеров, твёрдых и жидких углеводородов, нефтепродуктов, углеводородных топлив) неизбежно сопровождается процессами электризации, которые не только осложняют проведение технологических процессов, операций, снижая производительность оборудования, но и часто являются причиной пожаров и взрывов, приносящих большой материальный ущерб. Нередко такие взрывы приводят и к гибели людей. Наибольшую опасность представляют электрические разряды с поверхности заряженных нефтепродуктов и органических жидкостей, несмотря на то, что эти разряды часто имеют меньшую энергию по сравнению с разрядами с плёночных и сыпучих материалов. Связано это с наличием в приповерхностных слоях воздуха значительного количества насыщенных паров в широком интервале температур воспламенения и обладающих крайне низкой минимальной энергией зажигания. Образование зарядов статического электричества при контакте жидкого тела с твёрдым и одного твёрдого тела с другим во многом зависит от расстояния между трущимися поверхностями и их физического состояния (наличие плёнок влаги, загрязнений, микронеровностей), скорости и коэффициента трения, давления в зоне контакта, микроклимата окружающей среды, наличия внешних электрических полей.

В основе современных представлений об образовании зарядов статического электричества в различных средах лежит теория двойных электрических слоёв, возникающих на границе раздела двух фаз при условии, что контактирующие среды имеют различное количество носителей зарядов (электронов или ионов). Возможность накопления на перерабатываемых

материалах опасных электростатических зарядов определяется как интенсивностью возникновения (генерации), так и условиями стекания (рассеивания) зарядов в процессах разделения двойного слоя. Если контактирующие среды имеют свободные носители зарядов (т. е. электропроводны), то время релаксации будет мало и возникающий электростатический заряд мгновенно рассеивается, и электризации не происходит. В другом случае, когда одна из сред не электропроводна, на ней начинают накапливаться электростатические заряды, и при определённых условиях может возникнуть искровой разряд. Для большинства диэлектрических жидкостей, полимерных материалов $\tau_p \sim 10^4 \dots 10^8$ с. При этом в окружающем воздушном пространстве создаётся напряжённость электрического поля порядка 10^6 В/м, соответствующая электрической прочности воздуха.

Следовательно, основным критерием, определяющим способность веществ электризоваться, является их удельная электропроводность. В соответствии с «Правилами защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности» все вещества и материалы в зависимости от величины ρ_v подразделяются на диэлектрические ($\rho_v > 10^8$ Ом·м), антистатические ($\rho_v = 10^5 \dots 10^8$ Ом·м) и электропроводящие ($\rho_v < 10^5$ Ом·м). Наиболее сильно электризуются диэлектрические вещества и материалы, причём с ростом ρ_v увеличивается и интенсивность электризации. К ним относятся нефтепродукты и неполярные растворители, большинство мономеров, практически все полярные материалы, химические волокна и ткани, сыпучие органические вещества. Антистатические вещества не электризуются, если не происходит их интенсивного распыления или разбрызгивания через сопла или форсунки со скоростью в десятки и сотни метров в секунду. К таким материалам относятся некоторые полярные растворители (ацетон, спирты, сложные эфиры), некоторые amino- и фенолопласты, хлопчатобумажная ткань и ряд материалов, обладающих хорошими гидрофильными свойствами. Электропроводящие материалы в процессах производства и переработки не электризуются. К ним относятся все металлы и их сплавы, углеродистые материалы, водные растворы, электролиты.

Также как и в случае твёрдых диэлектриков, электризация потока жидкости не может возрастать беспредельно. Если плотность зарядов в потоке увеличивается настолько, что напряжённость поля в трубопроводе достигает электрической прочности перекачиваемой жидкости, то произойдёт искровой разряд. При этом предельная (критическая) объёмная плотность зарядов существенно зависит от диэлектрической проницаемости жидкости и диаметра используемого трубопровода. Склонность к электризации плоских полимерных материалов (лент, плёнок) оценивают величиной удельного поверхностного электрического сопротивления ρ_s в Ом/м². Полимерные материалы и плёнки не электризуются, если их ρ_s не превышает 10^{11} Ом/м². В

соответствии с «Правилами» значения r , v , веществ и материалов должны указываться в технологическом регламенте, а также в исходных данных для проектирования любого технологического процесса.

Опасность статического электричества. Статическое электричество (СЭ) представляет пожарную опасность, поскольку возникающие искровые разряды по энергии могут превышать минимальную энергию зажигания горючих сред: газов, паров, ЛВЖ, пылей мелкодисперсных материалов. Все взрывы и пожары в основном происходят в результате искрового разряда: или с поверхности заряженного диэлектрического материала, или с заряженного металлического незаземлённого оборудования и с тела человека на заземлённый предмет.

Наряду с пожарной опасностью статическое электричество представляет опасность и для обслуживающего персонала. Лёгкие «уколы» при работе с сильно наэлектризованными материалами вредно влияют на психику рабочих и в определённых ситуациях могут способствовать травмам на технологическом оборудовании. Сильные искровые разряды, возникающие при затаривании гранулированных материалов, могут вызвать и болевые ощущения. Кроме того, при постоянном прохождении через тело человека малых токов электризации возможны неблагоприятные физиологические изменения в организме, приводящие к профзаболеваниям. Вследствие этого в нашей стране в соответствии с ГОСТ 12.1.045–84 введены допустимые уровни напряжённости электростатических полей – $E_{\text{пред}}$. Так, для $E_{\text{пред}} = 60$ кВ/м максимальное время пребывания $t_{\text{чел}}$ без средств защиты составляет 1 ч. Для $E = 20$ кВ/м время пребывания персонала в электростатических полях не регламентируется.

Статическое электричество сильно влияет также на ход технологических процессов получения и переработки материалов и качество продукции. Так, при переработке жирных кислот взаимное отталкивание заряженных частиц столь значительно, что некоторые из них оседают по пути и не попадают в бункер, затем много частиц налипает на стенки бункера, затрудняя его разгрузку. При производстве полимерных плёнок в присутствии зарядов повышается их трение о направляющие, что объясняется эффектом электростатического прилипания. Это приводит к неравномерной деформации материала и его плохой намотке на барабаны. При больших плотностях заряда может возникнуть электрический пробой тонких полимерных плёнок электро- и радиотехнического назначения, что приведёт к браку выпускаемой продукции. Особенно большой ущерб наносит вызванное электростатическим притяжением прилипание пыли на полимерные плёнки. При прохождении плёнки через технологическое оборудование налипшие частицы вдавливаются в неё, в результате чего изменяется толщина плёнки, причём в производственных условиях обнаружить эти частицы не удаётся. Электризация затрудняет просеивание, сушку,

пневмотранспортирование и автоматическое дозирование мелкодисперсных материалов, поскольку они прилипают к стенкам технологического оборудования и слипаются между собой.

Для оценки опасности статического электричества и эффективности использования различных средств и методов защиты возникает необходимость проводить измерения уровня (тока) электризации, оценка которого существенным образом связана с агрегатным состоянием перерабатываемых материалов. Так, для оценки электризации жидкостей, мелкодисперсных и гранулированных материалов, транспортируемых по трубопроводам, используется метод измерения силы тока утечки с изолированного от земли участка трубопровода. Однако значительно труднее произвести эти измерения на диэлектриках, поскольку в данном случае отсутствуют свободно перемещающиеся заряды и распределение их на поверхности материала весьма неоднородно. Контактный метод для этого не годится, поэтому плотность зарядов на поверхности жидкости или твёрдого материала измеряют бесконтактным способом. Для этих целей используют однокаскадные электрометрические усилители постоянного тока с датчиками ёмкостного типа.

Методы и технические средства защиты от статического электричества.
Методы и средства защиты от статического электричества делятся:

- на не влияющие на сам процесс электризации, но ликвидирующие или снижающие возможность возникновения искровых разрядов;
- уменьшающие электризацию веществ и материалов;
- обеспечивающие рассеяние или отвод возникающих электростатических зарядов.

К числу основных методов защиты первой группы относится заземление технологического оборудования, тела человека, являющееся наиболее простым, но необходимым средством, поскольку энергия искрового разряда с проводящих незаземлённых элементов технологического оборудования во много раз (сотни и тысячи) выше энергии разряда с диэлектриков. Заземляться должны все электропроводящие части и элементы оборудования, на которых возможно накопление зарядов. Заземляются все металлические вентиляционные короба и кожухи термоизоляции трубопроводов и аппаратов, поскольку при движении запылённого воздуха и электризации теплоизоляционного материала (стекловаты) за счёт вибрации их потенциал относительно земли может достигать 3...4 кВ. Электросопротивление всей цепи заземления должно быть не более 100 Ом. Непроводящее оборудование, согласно «Правилам ...», считается электростатически заземлённым, если в любой его точке сопротивление по отношению к земле – не больше $5 \cdot 10^9$ Ом. Особое внимание необходимо уделять заземлению передвижных объектов или вращающихся элементов

оборудования, не имеющих постоянного контакта с землёй. Так, различные передвижные ёмкости, в которые наливают или засыпают электризующиеся материалы, должны быть перед заполнением установлены на специальное заземлённое основание или присоединены к заземлителю специальным проводником до того как будет открыт люк.

Серьёзное внимание, особенно во взрывоопасных производствах, необходимо уделять заземлению человека, поскольку разряд с его тела, вследствие накопления на нём в зависимости от способа заряжения (контактного или индукционного) больших потенциалов (7...12 кВ) и значительной ёмкости (до 300 пФ), очень часто является причиной пожаров и взрывов. Для этих целей используют специальную антистатическую обувь, антистатические браслеты, халаты, обувь с кожаной подошвой.

Чтобы обеспечить непрерывный отвод зарядов статического электричества с тела человека или передвижных ёмкостей, полы в таких помещениях должны быть обязательно электропроводящими, т. е. иметь ρ_v не более 10^6 Ом·м. К таким покрытиям для пола относятся бетон, керамическая плитка, ксилит, антистатический линолеум. Часто целесообразной является защита оборудования с помощью разрядников, расположенных вне взрывоопасных зон. Регулированием разрядного промежутка можно установить допустимое напряжение пробоя $U_{пр}$, безопасное для применяемого горючего вещества.

Процесс образования зарядов статического электричества сильно зависит от градиента скоростей контактирующих материалов, поэтому, уменьшив скорость транспортирования жидкостей, порошкообразных материалов, гранул, а также скорость переработки полимерных материалов, особенно плёночных, можно добиться снижения уровня электризации до безопасных величин, правда, это связано со снижением производительности. Вследствие этого ограничение скоростей применяют только тогда, когда невозможно обеспечить надёжную антистатическую защиту другими методами. Это в первую очередь относится к процессам транспортирования манометров, углеводородных жидкостей, нефтепродуктов. В соответствии с «Правилами ...» жидкости с $\rho_v < 10^5$ Ом·м можно перекачивать со скоростью до 10 м/с, с ρ_v до 10^9 Ом·м – до 5 м/с, а при $\rho_v > 10^9$ допустимая скорость транспортирования не должна превышать 1,2 м/с. Более точные значения определяются из документа «Допустимые скорости движения жидкостей по трубопроводам и истечения в ёмкости». Для увеличения производительности технологического оборудования скорость ограничивают не на всех стадиях процесса, а только перед заполнением приёмных ёмкостей, бункеров и резервуаров. Сливы осуществляют в релаксационные ёмкости, представляющие собой заземлённые участки трубопровода увеличенного диаметра и находящиеся у входа в приёмную ёмкость. Для сильно электризующихся жидкостей перед релаксационной ёмкостью могут быть

установлены специальные нейтрализаторы статического электричества (НСЭ) игольчатого или струнного типа.

Метод контактных пар способен значительно ограничить генерацию зарядов СЭ. Материалы по диэлектрической проницаемости можно расположить в трибоэлектрический ряд в такой последовательности, что любой из них приобретает отрицательный заряд при соприкосновении с последующим в ряду материалом и положительный – с предыдущим. При этом с увеличением расстояния в ряду между двумя материалами абсолютная величина заряда, возникающего между ними, возрастает.

Весьма эффективным методом устранения опасной электризации является антистатическая обработка, или применение специальных антистатических веществ, снижающих ρ , ир, жидкостей, полимерных материалов на несколько порядков. Самым простым методом снижения ρ перерабатываемых материалов является увлажнение поверхности перерабатываемого материала, поскольку влага служит хорошим проводником электрических зарядов и способствует их стеканию на заземлённые части технологического оборудования. Этот метод применим только для гидрофильных материалов, способных адсорбировать влагу. Для гидрофобных материалов, к которым относятся практически все полимерные материалы, увеличение влажности окружающей среды до 80...90 % не снижает их электризацию. В этом случае для её устранения в них вводят различные антистатические агенты (антистатики), которые в большинстве случаев являются поверхностно-активными веществами (ПАВ). По характеру действия их делят на три группы: гигроскопичные, полярные и маслянистые (смазывающие), уменьшающие коэффициент трения. Первые адсорбируют влагу из атмосферы, образуя на поверхности перерабатываемого материала тонкий проводящий слой влаги. Обычно это длинноцепочечные неионогенные (не диссоциирующее на ионы в водном растворе) соединения: высшие жирные спирты, амиды, амины, алкилфенолы и продукты их взаимодействия с оксидами этилена и пропилена. Недостаток их – слабая эффективность в сухой атмосфере ($\varphi < 40$ % об). Полярные вещества также образуют электропроводящий слой на поверхности материала. К ним относятся катионоактивные и анионоактивные вещества – от солей аминов и типичных аммониевых солей до гетероциклических соединений азота. Среди антистатики они занимают ведущее место, их действие проявляется уже при малых концентрациях.

Для снижения электризации жидкостей до безопасных уровней при перекачке жидкостей, топлив и растворителей на нефтяной основе, а также при приготовлении растворов полимеров (клеев) большое применение находят антистатические добавки (присадки). Это материалы – на основе металлов переменной валентности (олеатов хрома, кобальта, меди, нафтенатов этих металлов и солей хрома). Электрическое сопротивление

твёрдых полимерных материалов (пластмасс, резин, пластиков) можно снизить, вводя в их состав различные марки электропроводящего углерода, поскольку введение металлических порошков или стоит слишком дорого, или приводит к значительному ухудшению физико-химических показателей полимерных материалов. Другим направлением устранения зарядов статического электричества является применение нейтрализаторов статического электричества (НСЭ), которые используют как для твёрдых, мелкодисперсных, так и для жидких диэлектрических материалов, работающих по различному принципу. Так, для жидкостей принцип действия основан на увеличении их электропроводности под действием сильного электрического поля, для остальных же материалов принцип работы НСЭ состоит в отводе электростатических зарядов за счёт ионизации воздушного слоя между заряженной поверхностью и заземлёнными частями нейтрализатора или технологического оборудования.

Молниезащита. Под молниезащитой понимают комплекс защитных устройств от молнии, обеспечивающих безопасность людей, сохранность сооружений, оборудования и материалов от взрывов, загораний и разрушений. При проектировании молниезащиты различают защиту от прямых ударов молнии, электромагнитной индукции и от заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические конструкции.

Наиболее опасен прямой удар молнии, при котором её канал проходит через здание, сооружение и т. д. Сила тока молнии достигает 200 КА, напряжение – 150 МВ, температура канала – 6 000...30 000°С. При этом воздух расширяется, образуя ударную воздушную волну, разрушающую здания и сооружения.

Проявление молнии в виде электростатической и электромагнитной индукции заключается в действии электромагнитного поля молнии, ударяющей в объект или на расстоянии от него, и возникновении ЭДС. Эта ЭДС может вызвать искрение или сильное нагревание в местах с недостаточно плотными контактами между металлическими элементами конструкций, что может привести к пожару или взрыву (в зависимости от категории помещения).

Молния опасна высокими потенциалами, вызывающими поражение людей при прямом ударе, напряжением прикосновения и шага. Способ защиты от молнии выбирают в зависимости от назначения здания (сооружения), интенсивности грозовой деятельности в данном районе, ожидаемого количества поражений молнией в год. Среднегодовую грозовую деятельность в часах определяют по карте, приведенной в СН305–77, и «Инструкции по проектированию и устройству молниезащиты зданий и сооружений».

В зависимости от масштабов разрушения все сооружения делят на три категории:

I категория – под воздействием молнии может возникнуть пожар (взрыв) с большими разрушениями и человеческими жертвами (классы В-I и В-II по ПУЭ); здания I категории подлежат защите от прямых ударов молнии, вторичных воздействий и заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические конструкции;

II категория – сооружения, опасные в отношении взрыва, однако взрыв не может вызвать значительных разрушений и человеческих жертв, так как взрывоопасные и горючие вещества хранятся в специальной металлической таре (классы В-Ia, В-Iб, В-Iг, В-IIa); здания II категории подлежат защите от прямых ударов, вторичных воздействий и заноса высоких потенциалов через надземные и подземные металлические конструкции в местностях со средней грозовой деятельностью 10 ч и более в году;

III категория – сооружения, для которых прямой удар молнии представляет опасность только в отношении разрушений и пожаров (классы П-I, П-IIa, П-III). Здания III категории подлежат защите от прямых ударов молнии и от заноса высоких потенциалов по надземным конструкциям в местностях с грозовой деятельностью 20 ч и более в год.

Для защиты от прямых ударов линейных молний применяют молниеотвод, состоящий из молниеприёмника, воспринимающего удар молнии, токоотвода, соединяющего молниеприёмник с землёй и заземлителя, отводящего ток молнии в землю. Молниеотвод создаёт определённую зону защиты – часть пространства, в пределах которого обеспечивается защита сооружений от прямых ударов молний. Молниеотводы могут быть стержневыми, тросовыми и сетчатыми, а также одиночными, двойными и многократными.

Здания и сооружения I категории защищают отдельно стоящими или изолированными молниеотводами. На объектах II категории молниеотводы устанавливают непосредственно на самих объектах. Объекты III категории защищают молниеотводами любого типа. Металлическая кровля и стальные фермы могут быть использованы как молниеприёмники. Для защиты от прямых ударов молнии металлических наружных установок также применяют любые типы молниеотвода.

Для защиты от действия электромагнитного поля необходимо все находящиеся в здании металлические предметы, а также вводы в здание всех коммуникаций заземлять. При этом импульсное сопротивление не должно превышать 1 Ом. Для защиты от заноса опасных потенциалов запрещается вводить в объекты I категории провода воздушных линий электропередачи и связи. Энергию разрешается подводить по кабелям с заземлением оболочек.

Ввод воздушных линий внутрь объектов II категории при необходимости допускается, но нежелателен. В объекты III категории воздушные линии вводить разрешается. При этом заземляют штыри изоляторов и устанавливают защитные разрядники на вводе в здание.

14.2. Пожаровзрывобезопасность

Физико-химические основы процессов горения (взрывов). Горение – сложное быстропротекающее химическое превращение, сопровождающееся выделением значительного количества тепла и (обычно) свечением. В большинстве случаев горение представляет собой экзотермическое окислительное взаимодействие горючего вещества с окислителем. К горению относят не только процессы взаимодействия веществ с кислородом (или другими окислителями), но и разложение взрывчатых веществ, соединение ряда веществ с хлором и фтором, оксидов натрия и бария с диоксидом углерода и т. д. Химическая реакция горения всегда является сложной, т. е. состоит из ряда элементарных химических превращений. Химическое превращение при горении происходит одновременно с физическими процессами: переносом тепла и массы. Поэтому скорость горения всегда определяется как условиями тепло- и массопередачи, так и скоростью протекания химических реакций.

Условия возникновения и виды горения. Всё разнообразие процессов горения может быть сведено к двум основным явлениям: возникновению и распространению пламени. Появлению пламени всегда предшествует процесс прогрессирующего самоускорения реакции, вызванный изменением внешних условий: появлением в горячей среде источника зажигания, нагревом смеси горючего с окислителем до некоторой критической температуры стенками аппарата или в результате адиабатического сжатия. Зажигание горючей смеси инициируется внешним источником зажигания (электрической или фрикционной искрой, высоко нагретой поверхностью, открытым пламенем).

Если ограничиться рассмотрением зажигания газов искрой, то процесс может быть представлен в следующем виде: температура в канале электрической искры достигает 10 000 °С. В этой зоне происходит термическая диссоциация и ионизация молекул, что приводит к интенсивному протеканию химических реакций. Однако, вызвав горение в зоне разряда, искра может не вызвать дальнейшего распространения пламени по смеси. Горючую смесь может зажечь только такая искра, в канале которой выделяется энергия, достаточная для обеспечения условий распространения пламени на весь объём смеси. Для этого надо, чтобы близлежащие слои горючей смеси успели воспламениться, прежде чем нагретый искрой объём остынет. При горении химически неоднородных горючих систем, т. е. систем, в которых горючее вещество

и воздух не перемешаны и имеют поверхности раздела (твёрдые материалы и жидкости, струи газов и паров, поступающие в воздух), время диффузии окислителя к горючему веществу несоизмеримо больше времени, необходимого для протекания химической реакции. В этом случае процесс протекает в диффузионной области. Такое горение называют *диффузионным*. Все пожары представляют собой диффузионное горение. Если же время физической стадии процесса оказывается несоизмеримо меньше времени, необходимого для протекания химической реакции, то можно принять, что время сгорания химически неоднородной системы примерно равно времени протекания самой химической реакции. Скорость процесса практически определяется только скоростью химической реакции. Такое горение называют *кинетическим*, например, горение химически однородных горючих систем, в которых молекулы окислителя хорошо перемешаны с молекулами горючего вещества и не затрачивается время на смесеобразование (гомогенное горение). Поскольку скорость химической реакции при высокой температуре велика, горение таких смесей происходит мгновенно, в виде взрыва. Если продолжительность химической реакции и физическая стадия процесса горения соизмеримы, то горение протекает в промежуточной области, в которой на скорость горения влияют как химические, так и физические факторы. Пространство, в котором сгорают пары и газы, называется *пламенем*, или *факелом*. В случае когда горит заранее не подготовленная смесь паров или газов с воздухом, пламя называют *диффузионным*. Если такая смесь образуется в пламени в процессе горения, — пламя кинетическое. В условиях пожара газы, жидкости и твёрдые вещества горят диффузионным пламенем. Наиболее характерным свойством возникновения очага пламени является его способность к самопроизвольному распространению по горючей смеси. В понятие *распространение пламени* объединены разнообразные явления, сопровождающиеся образованием дефлаграционных (распространяющихся с дозвуковой скоростью) и детонационных (распространяющихся со сверхзвуковой скоростью) пламён. Дефлаграционные пламёна, в свою очередь, подразделяются на ламинарные и турбулентные. Для объяснения процессов, приводящих к возникновению горения и развитию процессов горения, предложены так называемые тепловая и цепная теории.

Тепловой взрыв. Под тепловым взрывом (или тепловым самовоспламенением) понимают процесс развития химических реакций, протекающих с достаточно большим выделением тепла, характеризующихся достаточно высокой энергией активации и заканчивающихся появлением пламени. Основной идеей тепловой теории является представление о наличии обратной связи между химической реакцией и выделяемым ею теплом. В ходе протекания экзотермического превращения выделяется тепло, пропорциональное скорости реакции, и вещество разогревается. При этом, в зависимости от интенсивности химической реакции и условий теплообмена с внешней средой, возможны следующие варианты развития процесса:

- если реакция идёт достаточно медленно и, значит, скорость тепловыделения невелика, стенки реакционного сосуда успевают выделяющееся тепло отводить в окружающую среду. В результате этого при некоторой температуре, лишь немного превышающей температуру окружающей среды, устанавливается тепловое равновесие между реагирующей системой и внешней средой;
- если начальная температура реагирующей системы достаточно высока и выделяющееся тепло не успевает отводиться во внешнюю среду, наблюдается процесс быстрого повышения температуры реагирующей системы, заканчивающийся появлением пламени. Этот процесс мы воспринимаем как самовоспламенение или взрыв. Тепловой взрыв возникает тем легче, чем выше скорость тепловыделения и больше температура сгорания. Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что в одних случаях самовоспламенение носит тепловой характер, а в других – цепной.

Цепной взрыв представляет собой разновидность автокаталитических реакций. Характерной особенностью цепного самовоспламенения является его автокатализ не конечными продуктами реакции (CO_2 и H_2O), а образующимися в результате промежуточных химических превращений свободными радикалами. К самовоспламенению и взрыву даже в изотермических условиях могут приводить разветвлённые цепные реакции. Отличие разветвлённых цепных реакций от других типов автокаталитических процессов заключается в периодическом возникновении реакций, в которых вместо одного активного атома или радикала возникает два или несколько новых.

Показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов – совокупность свойств, характеризующих их способность к возникновению и распространению горения. Следствием горения может быть пожар или взрыв. Всего показателей пожаровзрывоопасности более двадцати. Но нам будет достаточно рассмотреть наиболее часто применяющиеся (см. ГОСТ 12.1.044–89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов»).

Группа горючести – классификационная характеристика способности веществ и материалов к горению. По горючести вещества и материалы подразделяются на три группы:

- негорючие (несгораемые) – вещества (материалы), не способные к горению. Негорючие вещества могут быть пожаровзрывоопасными (например, окислители или вещества, выделяющие горючие продукты при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом);

- трудногорючие (трудносгораемые) – вещества и материалы, способные гореть при воздействии источника зажигания, но не способные самостоятельно гореть после его удаления;
- горючие (сгораемые) – вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться при воздействии источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления. Горючие жидкости с температурой вспышки не более 61 °С, зафлегматизированные смеси, не имеющие вспышки, относятся к легковоспламеняющимся (ЛВЖ). Особо опасными называют ЛВЖ с температурой вспышки не более 28 °С.

Температура вспышки – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой над её поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает. Значение температуры вспышки применяется при характеристике пожарной опасности жидкости. Температура вспышки жидкостей, принадлежащих к одному и тому же классу, закономерно зависит от физических свойств членов гомологического ряда. Она повышается с увеличением молекулярной массы, температуры кипения и плотности. Так, метиловый спирт имеет $M=32$ и $t_{\text{всп.}}=8^\circ\text{C}$, а последний член ряда, N-амиловый спирт, $-t_{\text{всп.}}=40^\circ\text{C}$.

Температура воспламенения – наименьшая температура вещества, при которой вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение.

Температура самовоспламенения – самая низкая температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся пламенным горением.

Нижние (верхние) концентрационные пределы распространения пламени (НКПРП и ВКПРП) – минимальное (максимальное) содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при которой возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания. Невозможность воспламенения горючей смеси при концентрации ниже НКПРП объясняется малым количеством горючего вещества и избытком воздуха. Смесь, имеющая небольшое количество горючего и избыток воздуха, характеризуется минимальной скоростью распространения пламени, низкой температурой горения (до 1 300 °С) и небольшим давлением взрыва (~0,3 МПа). При концентрации горючего в смеси выше НКПРП горение проходит с большой скоростью, давление при взрыве повышается. Верхний концентрационный предел распространения пламени (ВКПРП) характеризуется избытком горючего и малым количеством воздуха. Концентрационная область распространения пламени различных газо- и паровоздушных смесей неодинакова. Наибольшую область имеют

оксид этилена, водород, а наименьшую – пропан, бутан. Чем ниже НКПРП и больше концентрационная область распространения пламени, тем большую пожарную опасность они представляют. Зная область распространения пламени в процессе применения и хранения газов и горючих жидкостей, можно поддерживать такой режим, при котором концентрации горючего будут выше верхнего или ниже нижнего КП. Концентрационная область сильно зависит от температур и давлений в аппаратах и хранилищах. Поскольку НКПРП большинства горючих газов сравнительно невелик, переработка таких газов при концентрациях, меньших НКПРП, малоэффективна. Для взрывоопасных смесей с ВКПРП до 15...30 % об. целесообразно переобогащение смеси горючим и поддержание такой концентрации на заданном уровне в течение всего цикла технологического процесса. Например, для смесей углеводородов от метана до гексана с кислородом при нормальных условиях ВКПРП составляет 61...40 % об, для смесей с воздухом максимальное взрывоопасное содержание горючего составляет 15...7 % об.

Для газовых смесей заметное изменение области воспламенения наблюдается при пониженном давлении; при этом происходит её сокращение вплоть до смыкания нижней и верхней границ области воспламенения. Ниже этого давления воспламенение смеси любого состава невозможно. При повышении температуры на каждые 100 °С НКПРП снижается на 10 % от первоначальной величины, ВКПРП увеличивается на 15 %. В тех случаях, когда по технологическим (или экономическим) причинам процесс нужно вести при такой концентрации горючего газа с воздухом, которая находится в области распространения пламени, в смесь вводят флегматизаторы, в присутствии которых смесь становится негорючей. В качестве инертных флегматизаторов применяют азот, аргон, диоксид углерода, водяной пар, продукты сгорания топлива (H_2O , CO_2 , N_2).

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода при флегматизации и ингибировании газовых смесей (МВСК) – это такая концентрация кислорода в газо- или паровоздушной смеси, ниже которой воспламенение и горение смеси становятся невозможными при любом содержании горючего в этой смеси.

Мощность источника и минимальная энергия зажигания. С изменением мощности источника зажигания может изменяться область воспламенения. Особенно это характерно для диэлектрических разрядов. Так, увеличение мощности искры приводит к расширению пределов воспламенения горючей смеси, причём наиболее сильно увеличивается ВКПРП. Однако расширение области воспламенения происходит до определённого предела. Искры, которые не вызывают дальнейшего расширения области воспламенения, называются *насыщенными*. Допустимая энергия искрового разряда не должна превышать 40 % минимальной энергии зажигания.

Минимальной энергией зажигания называется наименьшее значение энергии электрического разряда, способное воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь газа (пара или пыли) с воздухом.

Температурные пределы распространения пламени (воспламенения) – такие температуры вещества, при которых его насыщенный пар образует в окислительной среде концентрации, равные соответственно нижнему (НТПРП) и верхнему (ВТПРП) концентрационным пределам распространения пламени. Для обеспечения безопасности технологический процесс проводят при температуре ниже НТПРП на 10 °С или выше ВТПРП на 15°С. На температурные пределы распространения пламени оказывает влияние начальное давление: уменьшение начального давления по сравнению с атмосферным приводит к снижению этого показателя, повышение – к увеличению.

Защита ТП и оборудования от аварий и взрывов

Действующей системой стандартов безопасности труда установлено, что производственные процессы и производственное оборудование должны быть пожаро- и взрывобезопасными (ГОСТ 12.3.0002–75, ГОСТ 12.2.003–74). Стандарты предусматривают систему контроля и управления технологическим процессом, обеспечивающую защиту работающих и аварийное отключение производственного оборудования. В комплекс пожаровзрывозащиты должен входить ряд вариантов защиты, связанных с исключением из процесса горючей (взрывоопасной) системы или возможных источников зажигания, а также с использованием способов ограничения и подавления взрывов. Следует учитывать, что мероприятия по защите от взрывов лучше всего осуществляются в оборудовании наименьшего объёма.

Распространённым способом снижения вероятности взрыва является установление безопасного технологического регламента, когда даже при резких возмущениях процесса его «опасные» параметры (температура, давление) не могут приблизиться к границе устойчивости. Снижение скорости протекания процесса достигается уменьшением скорости подачи исходных компонентов, варьированием температурного режима и применением специальных разбавителей.

Осуществление технологического процесса в среде инертного разбавителя (N_2 , CO_2 , H_2O) позволяет снизить вероятность взрыва смеси, однако добавки инертного компонента (70...110 % об. от горючей смеси) затрудняют отделение от них конечного продукта, требуют использования дополнительного технологического оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры. Инертные разбавители целесообразно использовать также на некоторых стадиях технологического процесса.

Значительное сужение концентрационных пределов воспламенения и подавление взрывов достигается при комбинированном действии химических ингибиторов (фторбромсодержащих углеводородов) с диоксидом углерода, азота, диэтиламином.

Предотвратить взрыв можно регулированием и поддержанием такого состава смеси, при котором содержание горючего компонента находится вне концентрационных пределов воспламенения. Поскольку НКПРП большинства горючих газов, используемых при получении полимеров, сравнительно невелик, переработка таких газов при концентрациях, меньших НКПРП, малоэффективна. Для взрывоопасных смесей с верхним концентрационным пределом воспламенения до 15...30 % целесообразно переобогащение смеси горючим и поддержание такой концентрации на заданном уровне в течение всего технологического цикла. Однако если процесс осуществляется в вакууме, то в случае нарушения герметичности аппарата возможны подсос воздуха и образование взрывоопасных концентраций и, как следствие, взрыв и разрушение технологического оборудования.

Технологическим способом снижения опасности является также перевод периодического или полунепрерывного технологического процесса в непрерывный. Вследствие уменьшения объёма реактора непрерывного действия, по сравнению с объёмом реактора периодического действия, при той же производительности снижается общий объём реакционной массы, находящейся в цехе. Тем самым облегчаются возможные последствия аварии, однако вероятность возникновения самой аварии и взрыва не уменьшается. Технологический режим (t, p) при непрерывном процессе поддерживается постоянным, что существенно облегчает автоматизацию технологического процесса и снижает его опасность.

Для производств, связанных с применением мелкодисперсных материалов (пылей), одной из задач является снижение летучести пыли. Для этого пыль увлажняют в местах её образования или в местах, где возможно увеличение содержания пыли в воздухе. Увлажнение проводят до такого состояния пыли, при котором не образуется аэрозоль. Замена пылесборников скрубберами с увлажнением помогает решить эту задачу. Для улучшения смачивания к воде добавляют ПАВ.

Достаточно эффективными мерами, обеспечивающими безопасность процесса, являются своевременное удаление скоплений пыли, обеспечение надёжной герметизации соответствующего оборудования, применение вакуумного транспортирования пылевидных материалов, снижающего содержание кислорода в горючей смеси, взамен транспортирования под давлением воздуха. Для уменьшения опасности взрыва очень часто оборудование для опасных операций или выносят на открытый воздух, или

размещают в небольших обособленных зданиях. Одним из важных мероприятий по предотвращению действия давления взрыва в системе является сброс давления через вышибаемые проёмы, к которым относятся остеклённые части здания, двери, распашные ворота, легкопанельные стены, лёгкие сбрасываемые крыши.

Ограничение и подавление взрывов. Механизм ограничения и подавления взрывов, как и в случаях тушения пожаров, основан на охлаждении, инертизации и ингибировании горения. Устройство, служащее для подавления взрыва, включает в себя три основных элемента:

- чувствительный датчик, реагирующий на определённый параметр взрыва (давление, температуру, тепловую радиацию);
- исполнительный механизм, который под влиянием начального импульса обеспечивает срабатывание устройства и диспергирование вещества, тушащего пламя. Скорость срабатывания устройства должна быть больше максимальной скорости нарастания давления взрыва;
- тушащее средство.

Период между моментами воспламенения и достижения разрушающего давления составляет примерно 30÷40 мс, поэтому автоматическая блокировка с тушащим средством должна срабатывать в течение более короткого времени. Широкое применение в химической промышленности нашли автоматические системы взрывозащиты, которые подразделяются на системы предупреждения, локализации и подавления взрывов.

Системы предупреждения аварий и взрывов могут быть двух видов:

- основные защитные воздействия первого вида, возвращающие процесс в режим нормального функционирования: подача «жёсткого» хладагента – она применяется в случае, когда развитие аварийной ситуации приводит к нарушению температурного режима, а резкое охлаждение не вызывает полного прекращения процесса; прекращение подачи одного или нескольких компонентов, когда причиной возникновения аварийной ситуации является нарушение расхода или соотношения исходных компонентов или когда нарушается температурный режим в сторону увеличения опасности; стравливание избыточного давления из аппарата – применяется, когда предаварийное состояние характеризуется повышением давления; подключение дополнительного технологического оборудования, например через ловушку, когда защитные воздействия первого вида приводят к временному замедлению процесса;
- *прекращение процесса* – осуществляется защитными воздействиями второго вида: сброс реакционной массы в специальную ёмкость, заполненную разбавителем; подача в реактор разбавителя, резко

затормаживающего процесс и делающего невозможным дальнейшее использование реакционной массы; подача «жёсткого» хладагента, если последовавшее за этим снижение температуры вызывает такие необратимые реакции, которые приводят к невозможности дальнейшего использования реакционной массы.

Системы локализации взрывов. Системы приводятся в действие при возникновении загораний и угрозе разрушения технологического оборудования и здания от избыточного давления. Принцип действия систем локализации заключается в обнаружении аварийного состояния датчиком – преобразователем, подаче исполнительной команды на срабатывание устройства разгерметизации, инертизации и пожаротушения. После срабатывания устройств разгерметизации (предохранительной мембраны) в очаг возгорания подаётся флегматизирующий инертный разбавитель или (через насадки – распылители) огнетушащее вещество для ликвидации или локализации загорания.

Чтобы предотвратить распространение пламени на смежные аппараты, применяют устройства блокирования – огнепреградители различных типов и пламеотсекатели. По способу устройства огнепреградители могут быть сухими, орошаемыми, с водяным статическим затвором. По конструкции они делаются с насадкой из гранулированных материалов, пластинчатые, сетчатые, металлокерамические или металловолоконистые. Огнепреградители используют также для оборудования «дыхательных», продувочных и сбросных линий аппаратов и ёмкостей с ЛВЖ, газопаровоздушных линий со взрывоопасными концентрациями смесей, коммуникаций с газами, способными к взрывному разложению. Пламегасящий эффект огнепреградителей определяется в основном диаметром пламегасящих каналов, поскольку длина и материал стенок этих каналов мало влияют на теплоотвод из зоны горения. При уменьшении диаметра пламегасящего канала увеличивается его поверхность на единицу массы реагирующей смеси, вследствие этого возрастают потери тепла из зоны горения. При критическом диаметре скорость реакции горения резко уменьшается, так что дальнейшее распространение пламени полностью прекращается.

Для локализации пламени в трубопроводах, транспортирующих различные горючие вещества (газы, пыли), применяют форсуночные пламепреградители. Принцип их действия заключается в создании огнетушащей зоны впереди движущегося фронта пламени специальными устройствами, которые обеспечивают высокоскоростную подачу жидкого или газообразного огнепреградителя в полость защищаемого трубопровода.

В качестве пламеотсекателей, предотвращающих распространение огня по газопроводу, используют изолирующие клапаны, а также гидрозатворы, которые обеспечивают механическое перекрытие рабочего сечения

газопровода шиберами или заслонками и одновременную подачу внутрь газопровода огнетушащей жидкости.

Устройства разгерметизации предназначены для обеспечения необходимого по условиям взрывозащиты проходного сечения для сброса избыточного давления, возникающего при взрыве внутри аппарата. При этом давление в аппарате не должно превышать допустимого значения.

Для обеспечения необходимой площади разгерметизирующих разгрузочных отверстий наибольшее применение нашли предохранительные устройства – клапаны и разрушающиеся мембраны. Разгрузка противовзрывных устройств должна быть организована таким образом, чтобы избежать выброса пламени в рабочее помещение и повторного взрыва. Для этого рекомендуется противовзрывные устройства снабжать трубами, площадь сечения которых должна быть не менее площади разгрузочного отверстия, а длина – не более 3 м. Трубы выводят наружу, причём они должны быть по возможности прямыми.

Пожаровзрывоопасность электроустановок. Во взрыво- и пожароопасных производствах, особенно при работе с взрывоопасными газами, парами, пылями (ацетиленом, оксидом этилена, ацетоном, диэтиловым эфиром), электроустановки могут быть источниками воспламенения. Так, при неправильной эксплуатации или неисправности электрооборудования возможны его перегрев или появление искровых разрядов, которые могут вызвать пожар или взрыв горючей среды, наносящий большой материальный ущерб. Поэтому электрооборудование, работающее во взрывоопасных средах, выполняется по специальным правилам и может эксплуатироваться без опасности их воспламенения.

Электрическая искра является одним из наиболее мощных источников воспламенения. Большая температура (около 10 000 °С) в канале искрового разряда способствует протеканию интенсивных окислительно-восстановительных реакций. Возникновение электрических искр в производственных условиях возможно при замыкании и размыкании электрических цепей в выключателях, рубильниках, пусковой и другой аппаратуре, а также при коротком замыкании, плохих электрических контактах.

Основными способами борьбы с воспламенением от электрооборудования являются правильный выбор и надлежащая эксплуатация этого оборудования во взрыво- и пожароопасных производствах. В связи с этим все помещения (цехи, участки), наружные установки, согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ), классифицируют на взрывоопасные (В-I, В-Ia, В-Iб, В-Iг, В-II, В-IIa) и пожароопасные (П-I, П-II, П-IIa, П-III) зоны.

Взрывоопасная зона — это пространство, в котором имеются или могут появиться взрывоопасные смеси и в пределах которого на исполнение электрооборудования накладываются ограничения с целью уменьшения вероятности возникновения взрыва, вызванного электрооборудованием.

К классу В-I относятся зоны производственных помещений, в которых выделяются горючие газы и пары в таком количестве и обладают такими свойствами, что они могут образовывать с воздухом или другими окислителями взрывоопасные смеси при нормальных недлительных режимах работы, например: при загрузке и разгрузке технологических аппаратов, хранении или переливании ЛВЖ, находящихся в открытых сосудах.

К классу В-Ia относятся зоны производственных помещений, в которых взрывоопасная концентрация газов и паров возможна только в результате аварии или неисправностей.

К классу В-Iб относятся те же зоны, что и к классу В-Ia, но имеющие одну из следующих особенностей:

- горючие газы в этих зонах обладают высоким нижним концентрационным пределом воспламенения ($>15\%$ об.) и резким запахом при ПДК;
- при аварии в этих зонах возможно создание только местной взрывоопасной концентрации, распространяемой на объём не более 5 % общего объёма зоны;
- горючие газы и жидкости используются в небольших количествах без применения открытого пламени, в вытяжных шкафах или под вытяжными зонтами.

К классу В-Iг относятся наружные установки, содержащие взрывоопасные газы, пары, жидкости, причём взрывоопасная концентрация может создаваться только в результате аварии или неисправностей.

К классу В-II относятся зоны производственных помещений, в которых возможны образования взрывоопасных концентраций пылей или волокон с воздухом или другим окислителем при нормальных, недлительных режимах работы.

К классу В-IIa относятся зоны, аналогичные зонам класса В-II, в которых взрывоопасные концентрации пылей и волокон могут образоваться только в результате аварий или неисправностей.

Пожароопасная зона — это открытое пространство, в котором могут находиться горючие вещества как при нормальном технологическом процессе, так и при возможных его нарушениях.

К классу П-I относятся зоны производственных помещений, в которых применяют или хранят жидкости с температурой вспышки выше 61 °С.

К классу П-II относятся зоны производственных помещений, в которых при проведении технологического процесса выделяются горючая пыль или частицы волокон с нижним концентрационным пределом воспламенения более 65 г/м³к объёму воздуха или взрывоопасные пыли, содержание которых в воздухе производственных помещений по условиям эксплуатации не достигает взрывоопасных концентраций.

К классу П-Па относятся зоны производственных и складских помещений, в которых содержатся или перерабатываются твёрдые или волокнистые горючие вещества; горючие пыли и волокна здесь не выделяются.

К классу П-III относятся наружные установки, в которых применяются или хранятся горючие жидкости с температурой вспышки паров выше 61 °С, а также твёрдые горючие вещества.

Применяемые в означенных помещениях электроустановки должны обеспечивать как необходимую степень защиты их обмоток от воздействия окружающей среды, так и необходимую безопасность в отношении пожара или взрыва по причине их неисправности. В соответствии с ПУЭ в пожароопасных зонах используется электрооборудование закрытого типа, внутренняя полость которого отделена от внешней среды оболочкой. Аппаратуру управления, защиты и светильники рекомендуется применять в пыленепроницаемом исполнении. Вся электропроводка должна быть обеспечена надёжной изоляцией. Во взрывоопасных зонах и наружных установках необходимо использовать взрывозащищённое электрооборудование, изготовленное в соответствии с ГОСТ12.2.020-76 «Электрооборудование взрывозащищённое». В соответствии с ним всё электрооборудование по уровню взрывозащиты, т. е. степени взрывозащиты, подразделяется на три класса:

- класс 2 — повышенной надёжности против взрыва, в котором взрывозащита обеспечена только при нормальном режиме работы;
- класс 1 — взрывобезопасное, в котором взрывозащита обеспечивается и при признанных вероятных повреждениях, кроме повреждений средств взрывозащиты;
- класс 0 — особо взрывобезопасное, в котором по отношению к взрывобезопасному приняты дополнительные средства взрывозащиты.

Взрывозащита обеспечивается взрывонепроницаемой оболочкой, искробезопасными электрическими цепями, недопущением появления опасных нагревов, искр, дуг; продувкой внутренних полостей чистым

воздухом или инертным газом; заполнением токоведущих полостей минеральным маслом, любым жидким негорючим диэлектриком; кварцевым заполнением оболочек; заполнением эпоксидными смолами, имеющими оболочку под постоянным избыточным давлением воздуха или инертного газа.

Пусковую аппаратуру (выключатели, магнитные пускатели) в классах В-I и В-II необходимо выносить за пределы взрывоопасных помещений и снабжать устройством дистанционного управления. Провода внутри взрывоопасных помещений следует прокладывать в стальных трубах или использовать для этих целей бронированный кабель. Светильники для классов В-I, В-II и В-Ia также должны быть взрывозащищёнными.