

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНИЦИАЦИИ ВЗРЫВА ГАЗООБРАЗНОЙ ИЛИ ПЫЛЕВОЙ ВЗРЫВООПАСНОЙ СРЕДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ КАБЕЛЯМИ

**V.V. Bychkov**, *Leading Specialist, Ltd. "NPP "Spetskabel";*

**A.S. Zalogin**, *Cand. Sc. (Engineering), General Director of Ltd. "NANIO CCVE";*

**A.V. Lobanov**, *Cand. Sc. (Engineering), General Director of Ltd. "NPP "Spetskabel";*

**A.P. Porshina**, *Engineer, Ltd. "NANIO CCVE"*

**В.В. Бычков**, *ведущий специалист ООО «НПП «Спецкабель»;*

**А.С. Залогин**, *канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Нанио ЦСВЭ»;*

**А.В. Лобанов**, *канд. техн. наук, генеральный директор ООО «НПП «Спецкабель»;*

**А.П. Поршина**, *инженер ООО «Нанио ЦСВЭ»*

**Аннотация.** Рассмотрена формула риска нанесения ущерба при взрыве газообразной или пылевой среды во взрывоопасной зоне промышленного производства. На основании анализа международных электротехнических словарей и нормативной документации на электрооборудование во взрывоопасных средах показано, что при оценке риска во взрывоопасных зонах промышленного производства большое значение имеет учёт вероятности инициации взрыва газообразной или пылевой среды электрическими кабелями для внешних электрических цепей. Проанализированы физические предпосылки для определения вероятности воспламенения взрывоопасной среды в процессе эксплуатации кабелей для внешних электрических цепей и скорректирована формула расчёта риска нанесения ущерба при взрыве газообразной или пылевой среды во взрывоопасной зоне промышленного производства с учётом вероятности инициации взрыва электрическими кабелями для внешних электрических цепей.

**Ключевые слова:** риск, вероятность, взрывоопасная среда, инициация взрыва, электрические кабели для внешних электрических цепей, полная группа событий.

**Abstract.** The formula for calculating the risk of damage caused by an explosion of gas or dust atmosphere in hazardous areas at industrial sites has been examined. The analysis of international electrotechnical vocabularies and regulatory documentation relating to electrical equipment for explosive atmospheres has demonstrated that by assessing the risk of explosion in hazardous areas of industrial production sites, it is important to consider the likelihood of explosions of gas or dust atmospheres caused by electrical cables for external electrical circuits. The physical basis of explosive atmospheres ignition probability during the operation of cables for external electrical circuits has been analyzed and the formula for calculating the risk of damage caused by explosion of gas or dust atmospheres in hazardous areas at industrial sites has been revised, taking into account the probability of an explosion caused by electrical cables for external electrical circuits.

**Key words:** risk, probability, explosive atmosphere, explosion initiation, electrical cables for external electrical circuits, exhaustive events.

## ВВЕДЕНИЕ

В сложившихся к настоящему времени представлениях о взрывобезопасности основной упор делается на возможную инициацию взрыва газообразной смеси электрооборудованием, из которого в силу конструктивных особенностей исключены электрические кабели. Однако опыт эксплуатации промышленных производств показывает, что очень часто инициатором воспламенения, а при наличии в воздухе взрывоопасной смеси, и взрыва являются именно электрические кабели.

Об аварийных режимах, связанных с цепями электрических кабелей, как основной причине образования и развития пожаров, сказано в [1, 2]. Так, в 2009 г. на конференции, посвящённой Федеральному закону «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», в докладе прозвучало следующее: по данным статистики в России в 2008 г. вследствие аварийных режимов в кабельных изделиях произошло 25 698 пожаров (64,2 % к общему числу пожаров от электроустановок) с прямым ущербом в 3 471 698 тыс. рублей и числом погибших 773 человека.

После аварии в одной из шахт Кузбасса в 2016 г. на совещании у Председателя Правительства Российской Федерации Росстандарту было поручено дополнить национальные стандарты требованиями к кабельной продукции и электронным приборам, применяемым в опасных по газу метан шахтах, что является реальным подтверждением влияния электрических кабелей на взрывоопасность промышленных объектов, содержащих взрывоопасную газообразную среду [3].

Одним из способов обеспечения взрывобезопасности промышленных производств является оценка и поддержание низкого уровня риска взрыва, инициированного электрооборудованием, математически описываемого вероятностью взрыва и возможными убытками. А для определения вероятности взрыва, обусловленной физическими свойствами электрических кабелей, необходимо установить возможные причины инициации взрыва газообразных взрывоопасных смесей за счёт особенностей конструкции и нарушения режима работы кабелей.

#### РИСК НАНЕСЕНИЯ УЩЕРБА ПРИ ВЗРЫВЕ ВЗРЫВООПАСНОЙ ГАЗООБРАЗНОЙ ИЛИ ПЫЛЕВОЙ СРЕДЫ ПРИ ИНИЦИАЦИИ ВЗРЫВА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕМ, РАЗМЕЩЁННЫМ ВО ВЗРЫВООПАСНОЙ ЗОНЕ

Согласно [4] риск нанесения ущерба при взрыве газообразной или пылевой среды инициированным электрооборудованием во взрывоопасной зоне промышленного производства рассчитывают по формуле:

$$R = f(\mathcal{E}) \cdot P_z (P_{it} + P_{id} + P_{ie} + P_{ii} + P_{im}), \quad (1)$$

где  $f(\mathcal{E})$  – функция, описывающая экономический ущерб от взрыва;

$P_z$  – вероятность существования взрывоопасной среды в зоне, где  $z$  пробегает значения 0; 1; 2 или 20; 21; 22;

$P_{it}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной среды от участка поверхности оборудования с повышенной температурой, превышающей предельно допустимую температуру;

$P_{id}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной среды в результате образования дуги или искры между электрическими частями оборудования;

$P_{ie}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной среды в результате разряда накопившегося электростатического заряда;

$P_{ii}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной среды под воздействием излучающейся энергии;

$P_{im}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной среды за счёт механического искрения или искрения при трении.

Вероятность  $P_z$  характеризует технологические свойства процесса, сопровождающегося выделением в окружающую среду газообразных веществ или взвешенных в газе мелких частиц вещества, в том числе горючей пыли, обладающих взрывоопасностью. Следовательно,  $P_z$  характеризует сам технологический процесс изготовления кабельного изделия в целом.

Вероятности, стоящие в скобках формуле (1), характеризуют возможность инициации воспламенения взрывоопасной среды, связанную с технологическим оборудованием.

#### ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИНЫ НЕОБХОДИМОСТИ УЧЁТА КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, РАЗМЕЩЁННЫХ ВО ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОНАХ, В ПРОЦЕССЕ ИНИЦИАЦИИ ВЗРЫВА ГАЗООБРАЗНОЙ ИЛИ ПЫЛЕВОЙ ВЗРЫВООПАСНОЙ СРЕДЫ

Для производства кабельного изделия используется технологическая линия, состоящая из электрооборудования и вспомогательных устройств.

Согласно международному электротехническому словарю [5] технологическая линия, основанная на использовании электрооборудования, называется электроустановкой: «826-10-01. Электрическая установка: совокупность взаимосвязанного электрического оборудования, имеющего согласованные характеристики и предназначенного для определённой цели». В том же словаре даётся определение для электрического оборудования: «826-16-01. Электриче-



ское оборудование: оборудование, используемое для производства, преобразования, передачи, распределения или потребления электрической энергии.

Примечание: примерами электрического оборудования могут быть электрические машины, трансформаторы, коммутационная аппаратура и аппаратура управления, измерительные приборы, защитные устройства, электропроводки, электроприёмники».

В международном электротехническом словаре [6], в котором определены термины, касающиеся электрооборудования для взрывоопасных сред, приводится следующее определение: «426-01-01. Электрооборудование взрывоопасных сред: электрооборудование, конструкцией которого исключена возможность воспламенения окружающей взрывоопасной среды в указанных условиях».

Согласно этому определению, делается акцент на обеспечении защиты электрооборудования с целью предотвращения воспламенения окружающей взрывоопасной среды. Это несомненно главное свойство электрооборудования для взрывоопасных сред, но в контексте ведущихся рассуждений важно перечисление типов устройств, входящих в перечень электрооборудования для взрывоопасных сред, а об этом в данном определении ничего не сообщается. В стандарте [7], описывающем требования к оборудованию для работы во взрывоопасных средах приведено следующее определение: «3.22. Электрооборудование: технические устройства, применяемые целиком или по частям и предназначенные для использования электрической энергии».

Примечание: кроме того, такие устройства осуществляют генерирование, передачу, распределение, хранение, измерение, регулирование, преобразование и потребление электроэнергии, а также включают в себя средства для её передачи».

Как следует из этого определения, средства передачи электроэнергии в виде электропроводки рассматриваются только включёнными в электрооборудование, то есть не самостоятельно. А согласно общетехническому определению [5], данному выше, электропроводка является самостоятельным типом электрооборудования.

Введём определение электропроводки [5]: «826-15-01. Электропроводка: совокупность одного или более проводов, кабелей или шин и частей для их прокладки, крепления и, при необходимости, механической защиты». С целью упрощения в дальнейшем будем понимать под электропроводкой наиболее часто применяемое устройство – кабели. В Изменениях № 1 к техническому регламенту Таможенного союза [8] кабели подразделяются на две группы: кабели для внутренних электрических цепей, входящие в состав электрооборудования и Ex-компонентов, и кабели

для внешних электрических цепей, не входящие в состав электрооборудования и Ex-компонентов. Так как в определении электрооборудования для работы во взрывоопасных зонах упоминаются средства для передачи электроэнергии, встроенные в электрооборудование, то кабели для внешних электрических цепей в неявной форме выпадают из рассмотрения вопросов взрывобезопасности. Поэтому в технологических линиях наряду с основными устройствами – электрооборудованием, предназначенным для взрывоопасных зон, мы рассматриваем кабели для внешних электрических цепей, принимающие самостоятельное участие в создании взрывоопасной обстановки.

Такое выделение кабелей для внешних электрических цепей из группы устройств, определяемых, как технологическое оборудование (включаемых в технологическую линию) для взрывоопасных зон, имеет глубокий смысл. В настоящее время кабели для внешних электрических цепей, подключаемые к электрооборудованию со всеми видами взрывозащиты, кроме взрывозащиты вида «искробезопасная электрическая цепь *i*», имеют практически одинаковую конструкцию. А это означает, что конкретный вид взрывозащиты электрооборудования не служит для взрывозащиты подключаемого кабеля.

Но так будет не всегда. Уже сейчас в [8] записано, что для электрооборудования с взрывозащитой вида *d*, должен применяться кабель, исключающий условия передачи горючих веществ и распространение пламени по самому кабелю. Но при этом, опять-таки, взрывозащита вида *d* не обеспечивает взрывозащиту самого кабеля. В кабеле должны быть использованы конструктивные решения, обеспечивающие собственную взрывозащиту кабеля, и они не совпадают с конструктивными решениями взрывозащиты вида *d* для электрооборудования.

Ещё сложнее обстоит дело с взрывозащитой вида «искробезопасная электрическая цепь *i*». Казалось бы, кабель, предназначенный для систем взрывозащиты вида «искробезопасная электрическая цепь *i*» и отвечающий специфическим требованиям к конструкции, входя в состав системы, получает взрывозащиту.

Однако система взрывозащиты вида «искробезопасная электрическая цепь *i*» имеет ограничения по значениям электрической ёмкости и индуктивности. Ограничения по значениям электрической ёмкости и индуктивности предъявляют и к входящим в систему кабелям. Индуктивность и электрическая ёмкость кабелей линейно зависят от длины. Поэтому в каждой конкретной системе взрывозащиты вида «искробезопасная электрическая цепь *i*» кабель имеет ограничение по длине, которая рассчитывается по специальной методике, например, как это изложено в [9]. А значит,

в конкретной системе взрывозащиты вида «искробезопасная электрическая цепь  $i$ » применение кабелей с длиной большей рассчитанной недопустимо, и взрывозащита вида «искробезопасная электрическая цепь  $i$ » не обеспечивает защиту кабеля, как такового, а обеспечивает взрывозащиту только отрезка кабеля конкретной длины, входящего в неё.

Под электрооборудованием будем понимать техническое устройство, изготовленное на заводе и поставляемое в собранном виде или по частям с разных заводов. В последнем случае свойство электрооборудования появляется после сборки отдельных частей в единое целое, сдачи в эксплуатацию, и называется такое устройство «сборкой».

Следует отметить, что предлагаемая модель оценки риска взрывоопасной зоны не противоречит существующей системе разработки видов взрывозащиты электрооборудования. Применение конкретного вида взрывозащиты к конкретному электрооборудованию приводит к снижению вероятности воспламенения взрывоопасной среды при данных условиях. Происходит изменение только численного значения вероятности, но при этом не изменяются физические основы воспламенения взрывоопасной среды и соответственно сущность модели оценки риска.

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНИЦИАЦИИ ВЗРЫВА ГАЗООБРАЗНОЙ ИЛИ ПЫЛЕВОЙ ВЗРЫВООПАСНОЙ СРЕДЫ ЗА СЧЁТ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИИ И НАРУШЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ КАБЕЛЕЙ

Рассмотрим на примере общей конструкции кабеля проявление различных физических причин, вследствие которых возможно воспламенение взрывоопасной газообразной среды с различными вероятностями.

##### 1. Вероятность воспламенения взрывоопасной среды от участка поверхности кабеля с температурой, превышающей предельно допустимую температуру.

Точечный нагрев поверхности кабеля возможен в следующих случаях:

- при наличии локального утонения диаметра токопроводящей жилы в процессе изготовления;
- при возникновении локальной деструкции полимера изоляции между двумя токопроводящими элементами и экраном в сердечнике кабеля (жила – жила, жила – экран, жила – броня при отсутствии экрана) с возникновением электрического пробоя;
- при возникновении сквозной трещины в изоляции (деструкция полимера в процессе трещинообразования);
- при ухудшенном локальном теплоотводе от поверхности кабеля;

- при нагреве участка кабеля от рядом расположенного оборудования.

Конечно, первые два случая более характерны для силового кабеля, но мы условились не детализировать рассматриваемую модель кабеля, что, несомненно, должно быть сделано при исследовании конкретных кабелей и установлении числового значения вероятности.

Поясним физический смысл каждого из вышеперечисленных случаев.

**А.** Утонение диаметра на локальном участке токопроводящей жилы преимущественно для проволок малых диаметров возможно при случайном рывке в процессе волочения. Такой рывок случается при кратковременном перепаде напряжения питания тяги. Для токопроводящих жил малых сечений нельзя исключать возможность рывков в процессе изолирования на экструзионных линиях. Возможен, хотя и менее вероятен, рывок одной изолированной жилы на отдающем устройстве при скрутке сердечника.

Рывок, с точки зрения воздействия растягивающего усилия на токопроводящую жилу, является процессом, протекающим в течение определённого интервала времени, но не мгновенным, потому что инерционные явления в тяжёлом оборудовании всегда относительно долговременные. Из этого следует, что перепад диаметров представляет собой плавную кривую, а не ступеньку. Поэтому резкого отражения электромагнитной волны, как от ступеньки, наблюдаться не будет. Но плотность тока, протекающего по жиле, будет максимальна в месте утонения диаметра и в этом месте начнёт выделяться дополнительное тепло.

Если кабель работает при максимальной токовой нагрузке для данного материала, то в месте утонения диаметра температура нагрева изоляции будет превышать максимально допустимую. В зависимости от длительности эксплуатации при максимальной токовой нагрузке растёт вероятность деструкции материала изоляции в месте утонения диаметра токопроводящей жилы с последующим электрическим пробоем изоляции. Обозначим такую вероятность  $P_{исл}$ .

**Б.** Как следует из последних работ по физике разрушения полимерных материалов, например из [10], к настоящему времени развита обобщённая молекулярно-кинетическая теория долговечности полимеров, основанная на объединении механического, термодинамического, кинетического и статистического подходов в рамках физики полимеров. Она основана на изначальном существовании дефектов в полимерах в форме субмикротрещин и микротрещин. Прочность и долговечность низкопрочных полимерных материалов, к которым относятся материалы, применяемые





в кабельной технике, практически определяются ростом одной, реже – нескольких самых опасных микро- и субмикротрещин до критической длины  $l_k$ , при которой наступает атермическая стадия процесса разрушения.

Логично предположить, что электрический пробой наступает в месте локализации таких микро- и субмикротрещин, размер которых приближается к критической длине (но не превышает её), что проявляется в виде локальной деструкции.

При значительном выделении энергии в виде тепла в месте пробоя с быстрым превышением предельно допустимой температуры в месте нагрева возможно воспламенение полимера изоляции.

Таким образом, инициация воспламенения газообразной или пылевой взрывоопасной среды возможна в одном из двух случаев: либо при точечном нагреве поверхности до температуры, превышающей предельно допустимую температуру, либо в случае воспламенения полимера в месте электрического пробоя. Обозначим вероятность, учитывающую оба варианта, как  $P_{ит2}$ .

**В.** Процесс в данном случае развивается так, как описано в случае **Б**, но электрический пробой не происходит, растущие микро- и субмикротрещины приобретают критическую длину, после чего наступает атермическая стадия процесса разрушения, заканчивающаяся образованием со скоростью звука сквозной трещины по окружности изоляции. Казалось бы, подобная трещина не создаёт никакой опасности: ведь токопроводящие жилы остаются на том же расстоянии друг от друга, а в щели полимерную изоляцию заменяет воздух, который имеет худшие изоляционные свойства, но не приводящий к электрическому пробую. Однако это возможно только при поддержании стабильного значения температуры. В реальных условиях эксплуатации кабеля подвергаются перепаду температур, в результате которого на поверхности изоляции в пределах сквозной трещины могут выделяться влага и другие химические элементы, резко снижающие поверхностное электрическое сопротивление, вслед за чем последует электрический пробой между токопроводящими жилами. Обозначим такую вероятность  $P_{ит3}$ .

**Г.** Не вдаваясь глубоко в физику образования ухудшения локального теплоотвода (простым примером может быть накопление пыли на ограниченном участке поверхности), следует предположить, что деструкция полимера изоляции происходит по механизму, описанному в случае **А**.

**Д.** Возможно образование потока тепла от электрооборудования, имеющего высокую рабочую температуру, трубопровода, с протекающим по нему потоком газа или жидкости с высокой температурой, или

близлежащего кабеля, работающего при предельной нагрузке с максимально допустимой температурой. В этом случае реально ожидать, что деструкция полимера изоляции происходит по механизму, описанному в перечислении **А**.

## 2. Вероятность воспламенения взрывоопасной среды при образовании дуги или искр между токопроводящими жилами кабеля.

В случае применения традиционного кабеля, имеющего оболочку, образование дуги или искры маловероятно, потому что пробой происходит между изолированными жилами через диэлектрик (изоляцию). И даже, если предположить, что воздушные полости в сердечнике кабеля заполнены взрывоопасным газом, взрыв его внутри кабеля остаётся маловероятным, потому что помимо прочего должно выполняться условие наличия взрывоопасной концентрации и непрерывного сообщения полостей между собой.

Тем не менее, для исключения голословных утверждений можно потребовать, чтобы независимо от класса зоны и вида применяемой взрывозащиты применялся в обязательном порядке кабель с заполнением воздушных полостей в сердечнике. Тогда можно будет утверждать, что электрический пробой под оболочкой кабеля будет происходить только через твёрдый диэлектрик и такой пробой не приведёт к образованию электрической искры или дуги.

Однако электрический пробой через диэлектрик приводит к двум другим негативным последствиям: нагреву до температуры, превышающей максимально допустимую и способной инициировать взрыв, и прямому воспламенению. При этом случай электрического пробоя из-за деструкции полимера с превышением предельно допустимой температуры и воспламенением полимера уже рассмотрен выше, в случае **1**.

Возможный электрический пробой между оголёнными токопроводящими жилами в месте монтажа в соединительных устройствах к кабелю не относится, так как в этих местах частично удалены оболочка и изоляция, которые не обеспечивают необходимую защиту. Такой пробой относится целиком к качеству выполненного монтажа.

Таким образом, при использовании качественного кабеля в оболочке и имеющего полимерное заполнение воздушных полостей в сердечнике, вероятность воспламенения взрывоопасной среды в воздухе в явном виде в результате образования дуги или искр между токопроводящими жилами кабеля равна нулю.

## 3. Вероятность воспламенения взрывоопасной среды в результате накопившегося на оболочке кабеля электростатического заряда.

Как известно [11], электростатический заряд может накапливаться как на металлах, так и на диэлектриках. Отличие поведения электростатических зарядов

дов заключается в том, что при заземлении металла накопившийся на нём электростатический заряд стекает на землю. В то время, как с диэлектрика за счёт его большого поверхностного электрического сопротивления электростатический заряд практически не стекает, а только накапливается до состояния разряда.

Кабели практически всегда имеют полимерную оболочку или шланг, на которых по тем или иным причинам будут накапливаться электростатические заряды. При благоприятных условиях подобные заряды могут разрядиться через воздушный промежуток с образованием искры и последующим взрывом при наличии взрывоопасной среды.

Следует отметить, что, с одной стороны, образование электростатических зарядов на полимерных оболочках кабелей относится к случайным процессам, учёт которых при детерминированном подходе не является возможным, с другой стороны, может рассматриваться вопрос о внесении в конструкцию кабеля таких изменений, которые бы позволили обеспечить быстрое рассасывание электростатических зарядов или стекание на землю.

Пока такие конструктивные изменения не разработаны, исключать возможность взрыва газообразной или пылевой взрывоопасной среды вследствие разряда электростатического заряда, нельзя.

Таким образом, любой кабель имеет некоторую вероятность воспламенения взрывоопасной среды за счёт разряда электростатического заряда, накопившегося на оболочке или защитном шланге. Обозначим такую вероятность  $P_{iec}$ .

#### 4. Вероятность воспламенения взрывоопасной среды под воздействием излучающейся энергии.

Передача электромагнитной энергии по кабелю сопровождается потоком электромагнитной энергии в виде поля в пространстве, окружающем кабель.

Известен способ ограничения электромагнитной энергии в виде поля, сопровождающего кабель – это экранирование сердечника. Экранирование снижает мощность сопровождающего электромагнитного поля, но не позволяет устранить его совсем. Поэтому вероятность воспламенения окружающей взрывоопасной среды за счёт излучения электромагнитного поля кабелем может быть достаточно незначительной, но её нельзя исключить совсем. Обозначим такую вероятность  $P_{iic}$ .

#### 5. Вероятность воспламенения взрывоопасной среды за счёт механического искрения или искрения за счёт трения.

Необходимо исключить как маловероятные вторичные процессы. Например, такие как двухсоставные: сначала происходит механическое повреждение с оголением металлических элементов в кабеле, а потом контактные явления в виде трения металлом о металл.

Тогда вероятность воспламенения взрывоопасной среды за счёт механического искрения или искрения за счёт трения с участием кабеля следует считать равной нулю, так как в кабеле все металлические элементы так или иначе покрыты слоем полимера (диэлектриком в общем случае).

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СЛУЧАИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОЙ ИЛИ ПЫЛЕВОЙ ВЗРЫВООПАСНОЙ СРЕДЫ С УЧАСТИЕМ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Все случаи воспламенения, учтённые в (1), относятся к физическим явлениям, которые реализуются с участием кабеля непосредственно во взрывоопасной зоне. Но существуют ещё два вида явлений, способных привести к взрыву взрывоопасного газа. Первое явление заключается в передаче по кабелю из невзрывоопасной зоны во взрывоопасную повышенного напряжения, превышающего предельно допустимое значение. А второе явление связано с распространением газообразного взрывоопасного вещества по воздушным полостям в сердечнике кабеля за пределы взрывоопасной зоны, и уже там создаются условия для возникновения взрыва.

Примером первого явления может служить аварийная ситуация в источнике питания, когда на выходе источника появляется повышенное напряжение, превышающее предельно допустимое, при поступлении по кабелю во взрывоопасную зону оно приводит к электрическому пробоя участка кабеля или присоединённого устройства (датчика или исполнительного устройства), расположенных на территории взрывоопасной зоны. В этом случае электрический пробой кабеля или присоединённого устройства вторичен. Первичной является авария источника питания, заканчивающаяся попаданием на вход кабеля или присоединённого устройства высоких значений тока и/или напряжения. И уже потом в кабеле или присоединённом устройстве может произойти электрический пробой либо в невзрывоопасной зоне, либо во взрывоопасной зоне. Тем не менее, имеет смысл ввести понятие вероятности события, заключающегося в аварии электрооборудования (источника питания), размещённого за пределами взрывоопасной зоны,  $P_{iae}$  и вероятности воспламенения газообразных взрывоопасных веществ в результате повышения температуры оболочки вследствие электрического пробоя при появлении на входе кабеля повышенных значений электрических напряжений и тока  $P_{iac}$ . Обозначим полную вероятность  $P_{ia}$ :

$$P_{ia} = P_{iae} + P_{iac} \quad (2)$$



При этом следует учитывать, что ни один из видов электрооборудования, размещённых во взрывоопасной зоне, непричастен к этому явлению.

Второй случай распространяется на возможность перемещения по сердечнику кабеля с воздушными полостями газообразных взрывоопасных веществ и легковоспламеняющихся жидкостей, которые, попадая в невзрывоопасную зону, накапливаются и приобретают способность к взрыву. Конечно, появление источника воспламенения в этом случае также возможно с некоторой вероятностью. Поэтому возможность взрыва накопленной взрывоопасной среды будет определяться вероятностью инициации воспламенения за счёт источников, существующих в конкретной невзрывоопасной зоне.

Если используется кабель с заполнением воздушных полостей в сердечнике полимером или резиновым наполнителем, то вероятность распространения по сердечнику кабеля газообразной взрывоопасной среды, а значит и взрыва в невзрывоопасной зоне, можно считать равной нулю. Но так как в настоящее время кабели с полимерным заполнением воздушных полостей в сердечнике не получили широкого применения, исключить полностью такую вероятность нельзя. Обозначим её  $P_{ir}$ .

Возможен ещё один неординарный случай. В [12, 13] предусмотрена возможность распространения пламени по воздушным полостям сердечника кабеля. Пламя, образуемое на входном конце кабеля в невзрывоопасной зоне, распространяется по воздушным полостям сердечника кабеля к выходному концу кабеля во взрывоопасной зоне и там поджигает газообразную взрывоопасную смесь. Обозначим такую вероятность  $P_{ip}$ .

### ВЫВОД ФОРМУЛЫ РИСКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ВЗРЫВА ГАЗООБРАЗНЫХ СМЕСЕЙ ЗА СЧЁТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

На основании вышеизложенного, запишем чему равны вероятности в формуле (1) с учётом добавившихся новых.

Вероятность воспламенения взрывоопасной среды от участка поверхности электрооборудования или кабеля с повышенной температурой, превышающей предельно допустимую температуру, определяется по формуле:

$$P_{it} = P_{ite} + P_{itc'} \quad (3)$$

где  $P_{ite}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной среды от повышенной температуры поверхности электрооборудования, превышающей предельно допустимую температуру;  
 $P_{itc'}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной среды от повышенной температуры участка поверхности кабеля.

Вероятность  $P_{itc}$  это вероятность трёх событий, входящих в случаи А; Б; В. Событие в случае А совместно в случаях Б и В. Но событие в случае В наступит только тогда, если не наступит событие в случае Б. Запишем полную группу случаев для события в случае Б [14, 15]:

$$1 = P_{itc2} + \overline{P_{itc2}}, \quad (4)$$

где  $\overline{P_{itc2}}$  – вероятность того, что не наступит случай Б. Из формулы (4) получаем:

$$\overline{P_{itc2}} = 1 - P_{itc2}. \quad (5)$$

Тогда вероятность того, что наступит случай В, будет равна:

$$P_6 = (1 - P_{itc2}) \cdot P_{itc3} \quad (6)$$

Полная вероятность воспламенения взрывоопасной смеси от температуры поверхности кабеля будет равна:

$$P_{itc} = P_{itc1} + P_{itc2} + (1 - P_{itc2}) \cdot P_{itc3} \quad (7)$$

Вероятность воспламенения взрывоопасной смеси в результате разряда, накопившегося на оболочке электрооборудования и кабелей электростатического заряда, составит:

$$P_{ie} = P_{iee} + P_{iec'} \quad (8)$$

где  $P_{iee}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной смеси в результате разряда, накопившегося электростатического заряда на поверхности оболочки оборудования.

Вероятность воспламенения взрывоопасной смеси под воздействием излучающейся энергии от оборудования и кабелей составит:

$$P_{ii} = P_{iie} + P_{iic'} \quad (9)$$

где  $P_{iie}$  – вероятность воспламенения взрывоопасной смеси в результате разряда, накопившегося электростатического заряда на поверхности оболочки оборудования.

Подставляя в формулу (1) значения вероятностей из формул (2); (7) – (9), а также вероятности  $P_{ir}$ ;  $P_{ip}$ , получим:

$$R = f(\mathcal{E}) \cdot P_z (P_{ite} + P_{itc} + P_{itc1} + P_{itc2} + (1 - P_{itc2}) \cdot P_{itc3} + P_{id} + P_{iee} + P_{iec} + P_{iie} + P_{iic} + P_{im} + P_{iae} + P_{iac} + P_{ir} + P_{ip}). \quad (10)$$

С целью приведения к единству формы написания, у вероятностей, у которых индексы содержат только два знака, дополним индексы третьим знаком  $e$  или  $c$ , чтобы из обозначения было видно, к какому объекту относится вероятность. Тогда формула примет окончательный вид:

$$R = f(\Xi) \cdot P_z (P_{ite} + P_{itc} + P_{itc1} + P_{itc2} + (1 - P_{itc2}) \cdot P_{itc3} + P_{ide} + P_{iee} + P_{iec} + P_{iie} + P_{iic} + P_{ime} + P_{iae} + P_{iac} + P_{ire} + P_{ipc}). \quad (11)$$

Для того, чтобы иметь возможность рассчитывать риск взрыва газообразной взрывоопасной смеси во взрывоопасной зоне, необходимо в сопроводительной документации на электрооборудование указывать численные значения вероятностей  $P_{iee}$ ;  $P_{iie}$ ;  $P_{ime}$ ;  $P_{iae}$ ; на кабели – численные значения вероятностей  $P_{itc1}$ ;  $P_{itc2}$ ;  $P_{itc3}$ ;  $P_{iec}$ ;  $P_{iie}$ ;  $P_{iac}$ ;  $P_{ire}$ ;  $P_{ipc}$ .

При этом следует сделать одно важное уточнение: все приведённые в формуле (11) вероятности должны быть указаны отдельно на момент поставки и на момент окончания срока эксплуатации. Это требование обусловлено тем, что основной принцип построения промышленных производств, содержащих взрывоопасные зоны, заключается в применении устройств взрывобезопасных, то есть защищённых в течение всего срока службы.

С целью обеспечения взрывобезопасности при использовании во взрывоопасных зонах электрооборудования предполагается применение видов взрывозащиты, описанных в комплексе международных стандартов IEC 60079. А для обеспечения взрывобезопасности при использовании во взрывоопасных зонах электрических кабелей должны поставляться специальные кабели для взрывоопасных сред. Для идентификации кабелей в качестве применяемых для прокладки во взрывоопасных средах, разработчики кабельной продукции могли бы провести опытную работу по экспериментальному определению вышеперечисленных вероятностей воспламенения взрывоопасной воздушной смеси на момент поставки и по окончании срока службы. С учётом совместных испытаний на надёжность и взрывобезопасность (в том числе и искробезопасность) было бы целесообразным установить в технических условиях нормируемые значения. Изготовленные по таким техническим условиям специальные кабели могли бы гарантированно применяться во взрывоопасных средах, обеспечивая предотвращение инициации взрыва газообразных и пылевых взрывоопасных сред и уверенность у потребителей в их безаварийной эксплуатации. Необходимо добавить, что для разных марок кабелей, численные значения отдельных вероятностей могут отличаться друг от друга и даже равняться нулю.

Изложенное в настоящей статье не распространяется на нагревательные кабели по ГОСТ 31610-30-1-2017 [14] и ГОСТ 31610-30-2-2017 [15], занимающие промежуточное положение между кабелями и электрооборудованием (устройствами) и рассматриваемые отдельно [16, 17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наряду с электрооборудованием и Ех-компонентами в инициации взрыва газообразных и пылевых взрывоопасных сред принимают участие электрические кабели для внешних электрических цепей. Рассмотрены вероятности инициации взрыва газообразных и пылевых взрывоопасных сред электрическими кабелями для внешних электрических цепей, которые учтены в формуле для расчёта риска нанесения ущерба при взрыве газообразной или пылевой среды во взрывоопасной зоне промышленного производства.

С целью обеспечения взрывобезопасности промышленных производств необходимо разработать специальные кабели для взрывоопасных сред. Необходимо определить и подтвердить экспериментально вероятность воспламенения газообразной или пылевой взрывоопасной смеси и утвердить в качестве технического требования в технических условиях на специальные кабели для внешних электрических цепей, присвоив кабелям определение «взрывобезопасный кабель».

## Список литературы

1. **Смелков Г.И., Рябиков А.И.** Проблемы обеспечения пожарной безопасности электропроводок и кабельных линий в свете требований действующих нормативных документов // Кабель-news. – 2009. – № 6–7. – С. 40–47.
2. **Смелков Г.И.** Пожарная безопасность электропроводок. – М.: Кабель 2009 – 328 с.
3. Протокол совещания у Председателя Правительства Российской Федерации, г. Новокузнецк, Кемеровская область от 04 апреля 2016 г. № ДМ-П9-24пр.  
URL: [government.ru/orders/selection/401/22567/](http://government.ru/orders/selection/401/22567/) (дата обращения: 25.02.2020).
4. **Залогин А.С., Поршина А.П., Лобанов А.В., Бычков В.В.** Риск во взрывоопасных зонах промышленного производства // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 4. – С. 82–88.
5. ГОСТ Р МЭК 60050-826-2009. Установки электрические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 27 с.





6. ГОСТ Р МЭК 60050-426–2009. Международный электротехнический словарь. Часть 426. Электрооборудование для взрывоопасных сред. – М.: Стандартиформ, 2007. – 30 с.

7. ГОСТ 31610.0–2014. Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2014. – 105 с.

8. Изменения № 1 в технический регламент Таможенного союза «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах (ТР ТС 012/2011)». URL: <http://normacs.info/projects/6830> (дата обращения: 20.02.2020).

9. **Жданкин В.** Оценка искробезопасности электрических цепей // СТА. – 2000. – № 3. – С. 72 – 80.

10. **Цой Б., Карташов Э.М., Шевелёв В.В.** Прочность и разрушение полимерных плёнок и волокон. – М.: Химия, 1999. – 496 с.

11. **Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д.** Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.

12. ГОСТ IEC 60079-14–2013. Взрывоопасные среды. Часть 14. Проектирование, выбор и монтаж электроустановок. – М.: Стандартиформ, 2014. – 125 с.

13. IEC 60079-14 Explosive atmospheres. Part 14: Electrical installations design, selection and erection.

URL: [https://www.techstreet.com/standards/iec-60079-14-td-5-0-b-2013?gclid=EAlalQobChMk5W2teqw4QIVhaoYCh3dJw-cEAMYAiAAEgIVnPD\\_BwE&sid=goog&product\\_id=1869395](https://www.techstreet.com/standards/iec-60079-14-td-5-0-b-2013?gclid=EAlalQobChMk5W2teqw4QIVhaoYCh3dJw-cEAMYAiAAEgIVnPD_BwE&sid=goog&product_id=1869395) (дата обращения: 12.03.2019).

14. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2002. – 479 с.

15. **Гнеденко Б.В., Хинчин А.Я.** Элементарное введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1976. – 168 с.

16. ГОСТ 31610.30-1–2017 (IEC/IEEE 60079-30-1:2015). Взрывоопасные среды. Часть 30-1. Нагреватели сетевые электрические резистивные. Общие требования и требования к испытаниям. – М.: Стандартиформ, 2018. – 53 с.

17. ГОСТ 31610.30-2–2017 (IEC/IEEE 60079-30-2:2015). Взрывоопасные среды. Часть 30-2. Нагреватели сетевые электрические резистивные. Руководство по проектированию, установке и техобслуживанию. – М.: Стандартиформ, 2018. – 53 с.

## ОТ РЕДАКЦИИ

Статья «Физические основы инициации взрыва газообразной или пылевой взрывоопасной среды электрическими кабелями» вызвала ряд критических замечаний специалистов, после чего авторами в текст статьи были внесены определённые изменения. В связи с тем, что ряд замечаний авторами не принят во внимание, но учитывая, что статья актуальна, редакция журнала решила опубликовать статью, сопроводив её наиболее важными замечаниями, над учётом которых авторам, возможно, если они согласны, придётся поработать в будущем.

1. В статье говорится о «точечном нагреве поверхности кабеля» вследствие «локального утонения диаметра токопроводящей жилы в процессе изготовления», причём это явление рассматривается как наиболее характерное для силовых кабелей. Однако колоссальный опыт производства данных изделий, накопленный в стране, не позволяет рассматривать обсуждаемое явление как вероятное. Кроме того, ничего конкретно не сообщается о том, каких масштабов достигает снижение диаметра токопроводящей жилы на практике, насколько «точечным» является этот эффект (то есть на какие длины он распространяется), насколько возрастает температура поверхности кабеля

2. Ссылаясь на литературу [10], авторы заявляют: «...к настоящему времени развита обобщённая ...

*теория долговечности полимеров... Она основана на изначальном существовании дефектов в полимерах в форме субмикротрещин и микротрещин. Прочность и долговечность низкопрочных ... материалов, ... применяемых в кабельной технике, практически определяются ростом одной, реже – нескольких самых опасных микро- и субмикротрещин ... . Логично предположить, что электрический пробой наступает в месте локализации таких микро- и субмикротрещин, размер которых приближается к критической длине...». Необходимо отметить, что [10] – это монография, посвящённая прочности плёнок и волокон, но не экструдированных, относительно толстых слоёв полимеров, входящих в состав кабельных изделий. Изначальное существование в кабелях дефектов в виде микро- и субмикротрещин и принятие этих дефектов в качестве основной причины электрического пробоя можно рассматривать лишь в качестве рабочей гипотезы, безусловно требующей тщательной экспериментальной проверки, которая не была приведена.*

3. Авторы отмечают: «Кабели практически всегда имеют полимерную оболочку или шланг, на которых по тем или иным причинам будут накапливаться электростатические заряды. При благоприятных условиях подобные заряды могут разрядиться через воздушный промежуток с образованием искры и



*последующим взрывом при наличии взрывоопасной среды*». Однако вновь изданный ГОСТ Р 58342–2019 «Кабели силовые и контрольные для применения в электроустановках во взрывоопасных средах. Общие технические условия» предъявляет требования к поверхностному сопротивлению кабельной оболочки. Соблюдение этого требования практически исключает возможность описанного выше события.

4. Авторами оцениваются риски внешнего по отношению к кабелю короткого замыкания (КЗ) в цепи (то есть не связанного с пробоем кабеля), а также перенапряжений в кабельной линии (КЛ), обусловленных аварией источника питания. Но КЛ штатным образом защищаются от КЗ путём аварийного отключения (характерное время срабатывания защиты составляет менее 1 сек.). Если же в КЛ могут возникнуть перенапряжения – линия также эффективно защищается путём применения ограничителей перенапряжений.

5. В статье также указывается *«на возможность перемещения по сердечнику кабеля с воздушными полостями газообразных взрывоопасных веществ и легковоспламеняющихся жидкостей...»* и далее *«на возможность распространения пламени по воздушным полостям сердечника кабеля»*, но, согласно

ГОСТ Р 58342–2019, конструкции кабелей должны быть герметичны и не распространять горение.

6. В принципе, авторы правильно рассматривают каждое из обсуждаемых явлений или процессов как вероятностное. Авторы также рекомендуют разработчикам кабельных изделий провести опытную работу по экспериментальному определению перечисленных вероятностей. Но объём такой работы огромен, и соответствующие затраты велики. Вряд ли такую работу можно выполнить хотя бы для одного конкретного кабельного изделия, тем более часть подобных опытов должна сопровождаться взрывом.

Редакция надеется, что сделанные и частично публикуемые замечания будут полезны авторам в дальнейшей работе.

Главный редактор журнала  
«Кабели и провода»

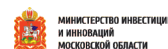
д-р техн. наук, профессор И.Б. Пешков

**Кабели монтажные гибкие ЭПОКС – универсальные конструкции, которые возможно использовать в самых разных областях промышленности в качестве:**

- монтажного кабеля;
- силового кабеля;
- контрольного кабеля;
- кабеля управления;
- интерфейсного кабеля и т.д.



**НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ  
УНИВЕРСАЛЬНЫХ МОНТАЖНЫХ ГИБКИХ КАБЕЛЕЙ**



**ЭПОКС**

☎ 8 800 302-78-83

✉ office@podolskkabel.ru

☎ +7 495 502-78-83

🌐 www.podolskkabel.ru

🏠 142103, МО, г. Подольск, ул. Бронницкая, д.11