

УДК 614.842.645

В.В. Севриков, д-р. техн. наук, профессор,

Севастопольский национальный технический университет

Ю.А. Хашин, канд. техн. наук, профессор,

Севастопольский национальный технический университет

А.В. Клемяшова, аспирант

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: ps@sevgtu14.sebastopol.ua

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПО УСЛОВИЮ ИХ ИСПОЛНЕНИЯ ДЛЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Предложен метод оптимизации выбора средств контроля для взрывоопасных объектов по условиям: исполнению, метрологическому обеспечению и технико-экономической целесообразности с учетом характеристик взрывоопасных условий.

В сфере топливно-энергетического комплекса, а также во многих отраслях промышленности, особенно в таких, как химическая, нефтехимическая, газовая широко распространены взрывоопасные объекты: производственные и складские помещения, емкости, технологическое оборудование, установки, газопроводы, и др. Наиболее подвержены авариям взрывоопасные объекты, деятельность которых связана с хранением, транспортировкой, использованием или переработкой легко воспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), газов, взрывоопасных твердых и пылевидных веществ и смесей. Учитывая опасность условий производственного процесса таких объектов их безопасность, в первую очередь, зависит от эффективности контроля их состояния и строгого соблюдения регламентных норм. Несоблюдение этих норм, в том числе использование средств контроля не соответствующих по исполнению условиям эксплуатации, может привести к авариям, сопровождающихся взрывами, пожарами и нередко достигающих масштаба катастроф.

Основные нормативные документы, которые регламентируют работу по обеспечению взрывобезопасности объектов: Закон Украины «Об объектах повышенной опасности», Госты и стандарты по взрывобезопасности (ГОСТ 12.1.010-76 «Взрывобезопасность. Общие требования»), Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Требования данных нормативных документов распространяются и на средства контроля, используемые во взрывоопасных условиях, как по безопасности их применения, так и по точности контроля. Однако в настоящее время нет регламентации научно-обоснованного метода выбора средств контроля, на практике в основном принимаются те средства, которые есть в наличии, в лучшем случае оценивается их точность.

В последнее время появились некоторые работы [1, 2], в которых предлагается научно-обоснованный метод выбора средств контроля по трем основным условиям: исполнению, метрологическому обеспечению и технико-экономической целесообразности. Однако, в этих работах практически не учтены взаимоподчиненность основных показателей безопасности и эффективности контроля.

Целью данной работы является обоснование выбора средств контроля для взрывоопасных условий исходя из их исполнения, как основного условия. При рассмотрении этого условия выполнен системный подход, учитывающий физические характеристики веществ, которые используются в технологической системе, и составляют уровень опасности объекта и их влияние на взрывобезопасность средств контроля. В соответствии с существующими требованиями, к работе во взрывоопасных условиях допускается только взрывозащищенное оборудование, представляющее собой электротехническое изделие специального назначения, в котором предусмотрены конструктивные меры по снижению или устранению возможности воспламенения окружающей взрывоопасной среды при его эксплуатации. Согласно Правилам устройства электроустановок взрывозащита определяется по следующим критериям:

- 1) классу взрывоопасной зоны, в которой оно установлено;
- 2) категории и группе взрывоопасной смеси, по которым установка (объект) классифицируется как взрывоопасная.

Характеристика взрывоопасных зон и классов

Взрывоопасность объекта характеризует принадлежащая ему взрывоопасная зона, которая представляет собой пространство в помещении или вокруг внешней установки, в котором присутствует взрывоопасная среда или она может создаваться вследствие природных или производственных факторов в количестве, требующем специальных мер в конструкции электрооборудования при его монтаже и эксплуатации. Класс взрывоопасной зоны, в соответствии с которым производится выбор

электрооборудования, определяется технологами совместно с электриками проектной или эксплуатирующей организации.

При определении взрывоопасных зон согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) принимается следующее:

а) взрывоопасная зона в помещении занимает весь объем помещения, если объем взрывоопасной смеси превышает 5 % свободного объема помещения;

б) взрывоопасной считается зона в помещении до 5 м по горизонтали и вертикали от технологического аппарата, из которого возможно выделение горючих газов или паров ЛВЖ, если объем взрывоопасной смеси равен или менее 5 % свободного объема помещения;

в) взрывоопасная зона наружных взрывоопасных установок считается в зависимости от величины расстояния 0,5; 3; 5; 8; 20 м по горизонтали и вертикали от источника горючих газов или паров ЛВЖ согласно ПУЭ, по которым классифицированы опасные зоны.

Выделены шесть классов взрывоопасных зон: В-I (фасовка и розлив ЛВЖ); В-Ia (насосы перекачивания ЛВЖ); В-Iб (машинные залы аммиачных компрессорных, аккумуляторные, лаборатории с хранением ЛВЖ и горючих веществ); В-Iг (надземные и подземные резервуары с горючими газами или ЛВЖ и автозаправочные станции); В-II (изготовление угольной, торфяной пыли); В-IIa (склады зерна).

Лимитирующими показателями взрывоопасных зон являются, объем взрывоопасной смеси в процентах от свободного объема помещения и концентрационные пределы воспламенения (взрыва) смесей. Сопоставление этих показателей с параметрами технологического процесса и количествами обращающихся веществ позволяет определить класс взрывоопасной зоны, в соответствии с которыми производится выбор электрооборудования, в том числе и средств контроля.

Характеристика взрывоопасных смесей

Вещества в аэрозольном, парообразном и газообразном состояниях в смеси с окислителем, чаще кислородом воздуха, при предельных концентрациях, образуют взрывоопасные смеси. Классификация взрывоопасных смесей выполнена по категориям и группам (ГОСТ 12.1.011-78, ПУЭ). Подразделение взрывоопасных смесей по категориям основано на исключении возможности их воспламенения (взрыва) продуктами взрыва в оболочке этой или другой смеси истекающей через безопасный экспериментальный максимальный зазор (БЭМЗ) во взрывоопасную среду при любой концентрации смеси в воздухе. БЭМЗ – максимальный зазор между фланцами оболочки, через который не проходит передача взрыва из оболочки в окружающую среду при любой концентрации смеси в воздухе.

Взрывоопасные смеси подразделены в зависимости от входящих в них веществ на категории I, IIa, IIb, IIc и в зависимости от их чувствительности к воспламенению по температуре самовоспламенения на группы T1, T2, T3, T4, T5, T6.

Температура самовоспламенения – самая низкая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся пламенным горением. Значение температуры самовоспламенения применяют при определении группы взрывоопасной смеси для выбора типа взрывозащищенного электрооборудования.

Величина БЭМЗ изменяется от 1 мм и выше для I категории, до 0,5 мм для более чувствительной смеси категории IIc. Температура самовоспламенения смеси изменяется от выше 450 °C для группы T1 до 80 °C для группы T6.

В целом распределение взрывоопасных смесей по категориям и группам фрагментарно представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение взрывоопасных смесей по категориям и группам

Категория смеси	Группа смеси	Вещества, образующие с воздухом взрывоопасную смесь	Температура самовоспламенения, °C
I	T1	Метан (рудничный)	>450
IIa	T1	Аммиак, ацетон и др. растворители, метан (промышленный), оксид углерода, пропан, этил хлористый и др.	>450
	T2	Алкилбензол, ангидрид уксусный, бензин, бутан, пропилен, растворители № 648 и др., разбавители РДВ и др., спирты, этилбензол, циклогексанон и др.	300...450
	T3	Бензины, гексан, гептан, керосин, нефть, спирт амиловый, топливо Т-1 и ТС-1, уайт-спирит, циклогексан, этилмеркаптан и др.	200...300

Продолжение таблицы 1

	T4	Ацетальдегид, альдегиды, декан, 1,1,3-триэтоксидан	135...200
	T5	-	100...135
	T6	-	80...100
ПВ	T1	Коксовый газ, синильная кислота	>450
	T2	Дивинил, диоксан, окись пропилен, окись этилена, формальдегид, этилен и др.	300...450
ПВ	T3	Акролеин, сероводород, топливо дизельное, этилловоль и др.	135...200
	T4	Дибуттиловый эфир, диэтиловый эфир, диэтиловый эфир этиленгликоля	135...200
	T5	-	100...135
	T6	-	80...100
ПС	T1	Водород, водяной газ, светильный газ	>450
	T2	Ацетилен, метилдихлорсилан	300...450
	T3	трихлорсилан	200...300
	T4	-	135...200
	T5	сероуглерод	100...135
	T6	-	100...135

Лимитирующими параметрами взрывоопасных смесей являются температура самовоспламенения T_{limcm} в градусах Цельсия и безопасный максимальный экспериментальный зазор оболочки оборудования (прибора) $h_{\text{lim об.}}$.

Исполнение средств контроля

Во взрывоопасных зонах, в которых в соответствии с ПУЭ требуется взрывозащищенное электрооборудование, запрещается эксплуатировать электрооборудование общего назначения, а также такое, которое не имеет маркирование относительно взрывозащиты, если на него не получено положительного письменного вывода испытательной организации. Взрывозащищенное электрооборудование подразделяется по уровням и видам взрывозащиты, группам и температурным классам.

Установлены следующие уровни взрывозащиты:

уровень 2 «электрооборудование повышенной надежности против взрыва» – взрывозащита обеспечивается только в определенном режиме его работы;

уровень 1 «взрывобезопасное электрооборудование» – взрывозащита обеспечивается как при нормальном режиме работы, так и при определенных вероятных повреждениях, определяемых условиями эксплуатации, кроме повреждений способов взрывозащиты;

уровень 0 «особо взрывобезопасное электрооборудование» – по отношению к «взрывобезопасному электрооборудованию» приняты дополнительные меры взрывозащиты, предусмотренные стандартами на виды взрывозащиты.

Виды взрывозащиты определены в соответствии со стандартами на взрывозащищенное электрооборудование.

По группам в зависимости от области применения взрывозащищенное электрооборудование подразделяется на: I – рудничное, предназначенное для подземных выработок шахт и рудников; II – для внутренней и наружной установки (кроме рудничного).

В свою очередь II группа подразделяется на три подгруппы (IIA, IIB, IIC) в зависимости от категории взрывоопасной смеси и на шесть температурных классов соответствующих группам взрывоопасных смесей. В таблице 2 представлены температурные классы электрооборудования группы II.

Таблица 2 – Температурные классы электрооборудования группы II

Температурный класс электрооборудования	Максимальная температура поверхности, °C	Группа взрывоопасной смеси, для которой электрооборудование является взрывозащищенным
T1	450	T1
T2	300	T1, T2
T3	200	T1 – T3
T4	135	T1 – T4
T5	100	T1 – T5
T6	85	T1 – T6

В маркировке взрывозащиты могут иметь место дополнительные знаки и надписи, соответствующие стандартам на электрооборудование с отдельными видами взрывозащиты, знак «Х», который может иметь место после обозначения маркировки взрывозащиты электротехнического устройства, означает, что в эксплуатационной документации на него указаны особые условия монтажа и (или) эксплуатации, связанные с обеспечением его взрывозащиты. Маркировка электрооборудования по взрывозащите в определенной последовательности имеет вид, например, обозначение 1ExdIIAT3: уровень взрывозащиты – взрывобезопасное электрооборудование (1), соответствует стандартам на взрывозащищенное электрооборудование (Ex), вид взрывозащиты – взрывонепроницаемая оболочка (d), группа (подгруппа) (IIA), температурный класс (ТЗ).

Проанализировав приведенную выше информацию о параметрах опасности взрывоопасных условий (смесей) и исполнению взрывозащищенного электрооборудования, за оценочный показатель выбора исполнения средств контроля можно принять лимитирующий параметр P_{cp} , согласованный с параметрами взрывной смеси $P_{см}$, тогда функция выбора может иметь вид: $P_{cp} = f(P_{см})$, условие выбора: $P_{cp} < P_{см}$, а с учетом необходимого запаса

$$P_{cp} \leq K \cdot P_{см}, \quad (1)$$

где K – коэффициент безопасности или коэффициент занижения лимитирующего параметра (опасности) к эквивалентному параметру средства измерения ($K < 1$).

Средства контроля должны удовлетворять не только всем требованиям взрывозащиты электрооборудования, но и другим им присущим особенностям не электрического характера. Для этого, дополнительно к изложенному, введем нижеследующие пояснения.

В целом условия взрывозащиты средств контроля, приборов, аппаратов, устройств и другого технологического оборудования как электрического, так и неэлектрического принципа действия можно разделить на 5 типов.

Первый тип – устройства электрического принципа действия с искроопасными электрическими цепями и взрывозащищенной оболочкой.

Второй тип – устройства электрического действия с отсутствующими искрящимися цепями или имеющие оболочки, заполненные инертными газами, жидкостями или сыпучим материалом.

Третий тип – устройства неэлектрического принципа действия, применяющихся в диэлектрических потоках или имеющие диэлектрические движущиеся элементы.

Четвертый тип – устройства и их элементов неэлектрического принципа действия, подверженных трению, не дающему искры или наличию и движению в них разогретых веществ и материалов, в результате чего происходит нагрев поверхностей, контактирующих с взрывоопасными смесями.

Пятый тип – устройства и их элементов неэлектрического принципа действия, которые при ударах (падениях) или движениях дают фрикционные или так называемые «холодные» искры.

Для средств контроля первого типа, как и других устройств электрического принципа действия, с искрящимися цепями и элементами, основной защитой является взрывозащищенная оболочка, в которую проникает взрывоопасная газовоздушная, паровоздушная, пылевоздушная смесь или смесь с другим окислителем. Проникновение взрывоопасной смеси из окружающей паровоздушной или другой среды, в которой расположены или применяются средства контроля и другие устройства данного типа, происходит через выше отмеченный зазор (БЭМЗ) данной оболочки. При наличии электрической искры в данной оболочке происходит воспламенение взрывоопасной смеси, переходящее во взрыв. Продукты взрыва, имеющие температуру выше температуры самовоспламенения смеси через зазор оболочки истекают в окружающую взрывоопасную среду, которая в свою очередь, взрывается с последующими катастрофическими последствиями. Чтобы не произошло этого, размеры зазора, в первую очередь, его сечение лимитируется, т.е. уменьшается до критического (безопасного), при котором в результате теплоотвода пламени оболочкой, температура истекающих газов снижается (становится) ниже температуры самовоспламенения взрывоопасной смеси. Таким образом, лимитирующим параметром взрывоопасной смеси $P_{см}$, является наименьшая ее температура самовоспламенения $T_{св.см}$, а лимитирующим параметром средства контроля (устройства) P_{cp} , является температура самовоспламенения продуктов взрыва истекающих из защитной оболочки T_{cp1} , тогда условие выбора средства контроля рассматриваемого типа примет вид $T_{cp1} < T_{св.см}$.

Для средств контроля второго типа, как и для других устройств электрического принципа действия с отсутствием электрических искр, основной защитой являются компаундные диэлектрические изоляционные устройства или оболочки, заполненные инертным (защитным) газом под избыточным давлением, или маслом, или кварцевым и ему подобным сыпучим материалом, в таких устройствах опасное тепловое действие электрической искры не выходит за поверхности их изоляции, контактирующие с взрывной средой. Основной причиной внутреннего искрения токоведущих элементов в данном случае является короткое замыкание, которое может возникнуть при неплотных контактах, их окислении, пробоях изоляции проводников, различном их сопротивлении и в других случаях.

Лимитирующим параметром для них будет являться температура поверхности устройства T_{cp2} , которая нагревается в основном путем теплопроводности от источника тепла (электрических искр). Лимитирующим параметром взрывоопасной смеси, контактирующей с такими устройствами, является наименьшая температура самовоспламенения $T_{св.см.}$, в этом случае условие выбора средств контроля имеет вид $T_{cp2} < T_{св.см.}$.

Средства контроля третьего типа, неэлектрического характера, применяются в условиях накопления на их поверхности зарядов различных знаков статического электричества, при столкновении которых образуются электрические искры способные воспламенить взрывоопасные смеси. Электрические заряды накапливаются на движущихся (трущихся) диэлектрических поверхностях, элементах и твердых, жидких, газовых, пылевых потоках. Особенно это имеет место в производствах химических отраслей (транспортировка органических диэлектрических жидкостей, газовых потоков по диэлектрическим трубопроводам, транспортировка пылегазовых потоков в угольных шахтах, хлебокомбинатах, текстильных производствах и др.). Разряды зарядов статического электричества происходят с тела человека и его одежды. Основной мерой защиты средств контроля данного типа является ограничение их режимов работы и применения специальных устройств – нейтрализаторов в потоках, а также заземлений электролизирующихся устройств. Все это направлено на снижение энергии разряда электрических искр используемых средств контроля W_{cp3} ниже минимальной энергии зажигания, взрывоопасной смеси $W_{мин см.}$. Минимальная энергия зажигания – наименьшее значение энергии электрического разряда, способной воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь газа, пара или пыли с воздухом. Условие выбора средств контроля данного типа определяется соотношением лимитирующих параметров, а именно $W_{cp3} \leq W_{мин см.}$.

Для средств контроля четвертого типа, не электрического характера, подверженных трению движения без возгорания и искр, контакту с транспортируемыми или хранящимися нагретыми веществами и материалами, контакту с оборудованием (трубопроводы, аппараты) и другими источниками тепла, основной мерой взрывозащиты, является ограничение температуры нагретых поверхностей контактируемых с взрывоопасными смесями. К средствам контроля этого типа относятся приборы, аппараты и их узлы, работающие под действием пневматической и гидравлической энергии, приводы с гибкой клиноременной передачей, сальники, подшипники без смазки и др. Из технологического оборудования этого типа широко распространены компрессоры, в которых повышается температура воздуха при его сжатии, воздухопроводы и трубопроводы по которым транспортируются нагретые жидкости, сыпучие материалы. Последние получают существенный дополнительный нагрев в результате сил трения и транспортировке по трубопроводам. Нагрев поверхностей и элементов средств контроля и поверхностей технологического оборудования до и выше температур самовоспламенения контактирующих с взрывоопасными смесями приводит к их воспламенению и взрывам. В этом случае лимитирующими параметрами являются температура нагретых поверхностей T_{cp4} и температура самовоспламенения взрывоопасных смесей $T_{св.см.}$. При этом условие безопасности по которому выбирается средство контроля и другие устройства имеет вид $T_{cp4} < T_{св.см.}$.

Для средств контроля и других устройств пятого типа неэлектрического принципа действия, которые при ударе (падениях), трении дают механические (фрикционные) искры. Ранее подобные искры назывались «холодные», однако неоднократные случаи взрывов газа метана с кислородом воздуха в угольных шахтах, других углеводородных смесей с кислородом и другими окислителями в химических и других производствах по причине механических искр, показали, что они совсем не «холодные» и имеют температуру T_{cp5} выше температуры самовоспламенения смеси $T_{св.см.}$. Размеры искр удара и трения, которые представляют собой раскаленную до свечения частичку металла или камня, обычно не превышает 0,5 мм, а их температура находится в пределах температуры плавления металла. Поэтому условие безопасного выбора средств контроля, ручного инструмента и других устройств неэлектрического принципа действия имеет вид $T_{cp5} < T_{св.см.}$.

С учетом вышеизложенного и принятых обозначений, используя метод экспертных оценок, согласно выражению (1) в общем виде можем записать условия выбора средств контроля, выделенных выше пяти типов.

При этом значение коэффициента K принимаем из стандарта [3]: для средств контроля и других устройств относящихся к третьему типу сопряженных с высвобождением энергии зажигания взрывоопасных смесей при разрядах зарядов статического электричества $K_3 = 0,4$; а для средств контроля и другого технологического оборудования, относящихся к четвертому типу $K_4 = 0,8$. Это есть крайние значения коэффициентов запаса, для опасных условий учитывая, что средства контроля и другие устройства, относящиеся к первому, второму и пятому типам входят по опасности в границы выделенного промежутка, предполагая некоторую разность условий опасности этих трех типов, значение коэффициентов безопасности можно ориентировочно рекомендовать следующие: $K_1 = 0,7$; $K_2 = 0,6$; $K_5 = 0,5$. Тогда условие безопасности для выбора средств контроля взрывоопасных объектов в общем виде имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{1-го типа } T_{cp1} &\leq 0,7 \cdot T_{св.см}; \\ \text{2-го типа } T_{cp2} &\leq 0,6 \cdot T_{св.см}; \\ \text{3-го типа } W_{cp3} &\leq 0,4 \cdot W_{мин.см}; \\ \text{4-го типа } T_{cp4} &\leq 0,8 \cdot T_{св.см}; \\ \text{5-го типа } T_{cp5} &\leq 0,5 \cdot T_{св.см}. \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывая, что стоимость средств контроля увеличивается с ужесточением условий (2), оптимальный результат достигается на границе возможных решений, т. е. при замене неравенств в системе (2) на знаки равенств. Лимитирующие параметры приведенных условий определяются экспериментально с помощью стандартных методов испытания [4] и расчетным способом. Последний дает больше погрешности чем экспериментальный и поэтому расчетный способ следует принимать для менее опасных условий или данные расчета следует уточнять экспериментальными испытаниями для конкретных наиболее опасных условий. Расчетные методы продолжают совершенствоваться. Для реализации расчетных операций по приведенным условиям безопасности (2) необходимо дальнейшее математическое моделирование этих условий на основе известных математических зависимостей термодинамических процессов.

Выводы

1. Выполнен анализ оценок взрывоопасности объектов и взрывозащиты средств контроля и предложена их дополнительная типизация.

2. В общем виде представлены лимитирующие параметры и условия безопасности для выбора средств контроля взрывоопасных объектов.

Перспективой дальнейших исследований является математическое моделирование безопасности условий для выбора средств контроля взрывоопасных объектов на основе известных закономерностей процессов термодинамики.

Библиографический список

1. Карпенко В.А. Новый подход и методика технико-экономического обоснованного выбора средств контроля / В.А. Карпенко // Вестник СевГТУ. Сер. Экономика: сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — № 44. — С. 3 – 7.
2. Севриков И.В. Постановка задачи исследования по научному обоснованию выбора средств контроля взрывоопасных объектов / И.В. Севриков, Ю.Н. Иванов, А.В. Клемашова // Зб. наук. пр. СХУЯЕіП. — Севастополь, 2006. — № 18. — С. 133 – 140.
3. ГОСТ.12.1.044-85. Государственный стандарт Союза ССР. Пожарная безопасность. Общие требования. — М.: Изд-во Стандартов, 1985. — 77 с.
4. ГОСТ 12.1.044-84. Государственный стандарт Союза ССР. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методов их определения. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 134 с.

Поступила в редакцию 23.07.2007 г.