

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТУШАЩЕГО ЗАЗОРА И КАТЕГОРИИ ВЗРЫВООПАСНОЙ СМЕСИ

**Цель работы:** рассчитать теоретически и ознакомиться с экспериментальным методом определения величины тушащего зазора, по которому научиться устанавливать категорию взрывоопасных смесей и осуществлять подбор взрывозащитного электрооборудования.

**Приборы и оборудование:** стенд ОТ 17.

### 1. Общие положения

Современные предприятия характеризуются использованием, переработкой и получением большого количества пожаровзрывоопасных продуктов. Производственные процессы этих предприятий связаны с реальной опасностью образования взрывоопасной среды, которая может воспламениться от искр замыкания и размыкания электрических цепей и нагретых частей электрооборудования.

**Взрывоопасной средой** являются смеси веществ (газов, паров, пылей) с воздухом и другими окислителями (кислородом, озоном, хлором, окислами азота и др.), способные к взрывчатому превращению, а также индивидуальные вещества, склонные к взрывному разложению (ацетилен, озон, гидразин, аммиачная селитра и др.).

*Основными параметрами, характеризующими взрывоопасность среды, являются:* температура вспышки; концентрационные и температурные пределы воспламенения; температура самовоспламенения; нормальная скорость распространения пламени; минимальное взрывоопасное содержание кислорода (окислителя); минимальная энергия зажигания; чувствительность к механическому воздействию (удару и трению).

**Температура вспышки** – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает.

В зависимости от численного значения температуры вспышки жидкости подразделяются на легковоспламеняющиеся (ЛВЖ) и горючие (ГЖ).

*К легковоспламеняющимся жидкостям* относятся жидкости с температурой вспышки не более 61°C в закрытом или 66°C в открытом тигле. Для ЛВЖ температура воспламенения обычно на 1–5°C выше температуры вспышки, а для горючих жидкостей эта разница может достигать 30–35°C. К ЛВЖ относятся, например, бензин, керосин, ацетон и др., к ГЖ – минеральные и растительные масла и др.

**Температура самовоспламенения** – это наименьшая температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее к возникновению горения с пламенем. Значение температуры самовоспламенения используется при определении группы взрывоопасной

смеси для выбора типа взрывозащищенного электрооборудования, при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов.

По температуре самовоспламенения взрывоопасные смеси газов и паров подразделяют на шесть групп (табл. 13.1).

Таблица 13.1

**Классификация взрывоопасных смесей по температуре самовоспламенения**

Группы взрывоопасных смесей	Температура самовоспламенения, °С
T1	Свыше 450
T2	Свыше 300 до 450 включ.
T3	Свыше 200 до 300 включ.
T4	Свыше 135 до 200 включ.
T5	Свыше 100 до 135 включ.
T6	Свыше 85 до 100 включ.

**Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени (НКПРП и ВКПРП)** – минимальное (максимальное) содержание горючего в смеси горючее вещество – окислительная среда, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания. Внутри этих пределов смесь горюча, а вне их – смесь гореть неспособна.

Значения концентрационных пределов применяются при определении категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности, при расчете взрывобезопасных концентраций газов, паров и пылей внутри технологического оборудования и трубопроводов, при проектировании вентиляционных систем, а также при расчете предельно допустимых взрывобезопасных концентраций газов, паров и пылей в воздухе рабочей зоны с потенциальными источниками зажигания, при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объекта.

На рис. 13.1 представлена зависимость скорости процесса горения взрывоопасных смесей от концентрации газов и паров.

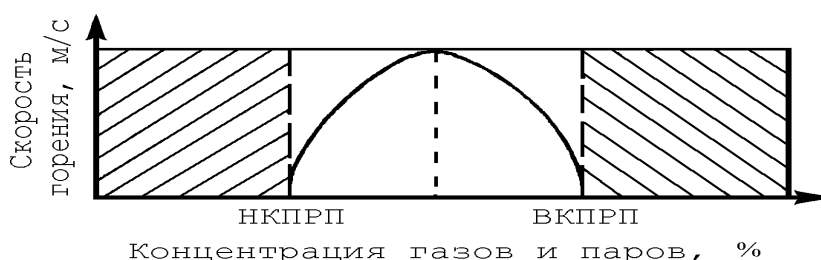


Рис. 13.1. Зависимость скорости процесса горения взрывоопасных смесей от концентрации газов и паров

Максимальная скорость процесса горения достигается при **стехиометрической концентрации**, т. е. при концентрации, состав которой точно соответствует количественному содержанию веществ, соединяемых друг с другом при реакции горения.

Интервал между нижним и верхним пределами называется **областью воспламенения**. Величины пределов воспламенения используют при расчете допустимых концентраций внутри технологических аппаратов, систем рекуперации, вентиляции, а также при определении предельно допустимой взрывоопасной концентрации (ПДВК) паров и газов при работе с использованием искрящего инструмента.

Для газов и паров жидкости НКПРП и ВКПРП определяются в объемных процентах, для пыли и волокон – в граммах на кубический метр.

Аэрозвеси в зависимости от НКПРП делятся на *особо взрывоопасные* с НКПРП  $\leq 15$  г/м<sup>3</sup>, *взрывоопасные* с НКПРП  $\leq 65$  г/м<sup>3</sup> и *пожароопасные* с НКПРП  $> 65$  г/м<sup>3</sup>.

Кроме объемных пределов воспламенения для паров ЛВЖ и ГЖ имеются температурные пределы распространения пламени.

**Температурные пределы распространения пламени** (НТПРП и ВТПРП) – такие температуры вещества, при которых его насыщенный пар образует в окислительной среде концентрации, равные соответственно НКПРП и ВКПРП.

Температурные пределы воспламенения учитывают при расчете безопасных температурных режимов закрытых технологических аппаратов с жидкостями и летучими твердыми веществами, работающих при атмосферном давлении. Безопасной для образования взрывоопасных паровоздушных смесей следует считать температуру вещества на 10°С ниже НТПРП или на 15°С выше ВТПРП.

**Нормальная скорость распространения пламени** – скорость перемещения фронта пламени относительно несгоревшего газа в направлении, перпендикулярном к его поверхности. Такое неосложненное горение называется *нормальным*, а скорость перемещения пламени по неподвижной смеси вдоль нормали к его поверхности – нормальной скоростью пламени  $V_n$ , см/с.

Значение нормальной скорости распространения пламени применяется в расчетах скорости нарастания давления взрыва газо- и паровоздушных смесей в закрытом, негерметичном оборудовании и помещениях; критического (гасящего) диаметра при разработке и создании огнепреградителей; площади легко сбрасываемых конструкций, предохранительных мембран и других разгерметизирующих устройств; при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов.

**Минимальная энергия зажигания** – наименьшая энергия электрического разряда, способная воспламенить наиболее легко воспламеняющуюся смесь горючего вещества с воздухом.

Значение минимальной энергии зажигания применяется при разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасных условий переработки горючих веществ и электростатической искробезопасности технологических процессов.

Для ориентировочного расчета минимальной энергии зажигания паров и газов в воздухе  $E_{\min}$ , мДж, применяется формула

$$E_{\min} = 0,049 \cdot d_{\text{кр}}^{2,2}, \quad (13.1)$$

где  $d_{кр}$  – критический зазор, величину которого можно получить расчетным путем или на основе справочных данных, мм.

**Критическим зазором (диаметром)** называется максимальный диаметр трубки, через который невозможно распространение пламени горючей смеси.

С критическим диаметром (зазором) связано также определение **категории взрывоопасной смеси**, которая характеризует способность газопаровоздушной смеси передавать взрыв через узкие щели и фланцевые зазоры.

В соответствии с ГОСТ 30852.11-2002 «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 12. Классификация смесей газов и паров с воздухом по безопасным экспериментальным максимальным зазорам и минимальным воспламеняющим токам» взрывоопасные смеси газов и паров подразделяются на категории взрывоопасности в зависимости от величины **безопасного экспериментального максимального зазора (БЭМЗ)** и значения соотношения между минимальным током воспламенения испытуемого газа или пара к **минимальному току воспламенения метана (МТВ)**.

**БЭМЗ** – это экспериментальный максимальный зазор, через который не происходит передача взрыва из оболочки в окружающую среду при любой концентрации горючего в воздухе.

Если шарообразную оболочку (рис. 13.2), части которой соединены между собой плоскими поверхностями, заполнить газопаровоздушной смесью и поместить в пространство с этой же смесью, то при поджигании ее в оболочке пламя, проникая через зазор (щель) между прилегающими поверхностями длиной  $a$ , может воспламенить окружающую среду, т. е. передать взрыв наружу. При определенных значениях длины и ширины зазора  $b$  в нем происходит затухание пламени. Это обусловлено тем, что тепловыделение при горении взрывоопасной смеси, заключенной в объеме зазора, меньше теплоотдачи к стенкам зазора. В узких каналах вследствие потерь тепла на стенки происходит понижение температуры в зоне реакции, уменьшение скорости распространения пламени, и пламя гаснет. Зазор между плоскими поверхностями длиной 25 мм, при котором частота передачи взрывов из стандартной оболочки составляет 50%, принят за критический пламегасящий.

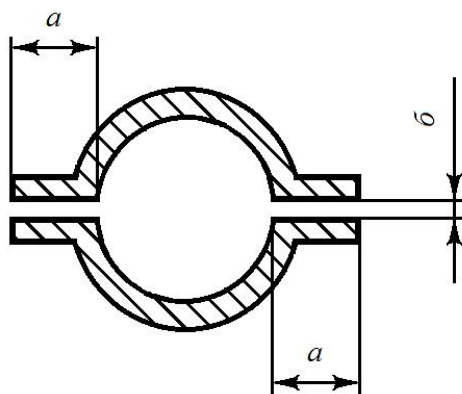


Рис. 13.2. Шарообразная оболочка для определения величины тушащего зазора:  
 $a$  и  $b$  – длина и ширина зазора

Взрывоопасные смеси подразделяются на категории:

I – метан на подземных горных работах;

II – газы и пары, за исключением метана на подземных горных работах.

В зависимости от значения БЭМЗ и МТВ газы и пары категории II подразделяются согласно табл. 13.2.

Таблица 13.2

**Категории взрывоопасности смесей  
в зависимости от величины БЭМЗ и МТВ**

Категория взрывоопасности смесей	Величина БЭМЗ, мм	Величина МТВ
IIA	0,9 и более	более 0,8
IIB	более 0,5, но менее 0,9	от 0,4 до 0,8 включ.
IIC	0,5 и менее	менее 0,45

Для классификации большинства газов и паров достаточно использовать или БЭМЗ, или соотношение МТВ.

Одного критерия достаточно в следующих случаях:

- для категории IIA – БЭМЗ превышает 0,9 мм или соотношение МТВ превышает 0,9;
- для категории IIB – БЭМЗ от 0,55 до 0,9 мм или соотношение МТВ от 0,5 до 0,8;
- для категории IIC – БЭМЗ меньше 0,5 мм или соотношение МТВ меньше 0,45.

Необходимо определять как БЭМЗ, так и соотношение МТВ, когда известны только:

- соотношения МТВ, и они находятся в диапазоне 0,8–0,9 или 0,45–0,5 (тогда требуется определение БЭМЗ);
- БЭМЗ, и его значение находится в диапазоне 0,5–0,55 мм (тогда требуется определение соотношения МТВ).

Распределение взрывоопасных смесей по категориям и группам приведено в табл. 13.3.

Таблица 13.3

**Распределение некоторых взрывоопасных смесей по категориям и группам**

Категория взрывоопасных смесей	Группы взрывоопасных смесей в зависимости от температуры самовоспламенения					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	2	3	4	5	6	7
I	Метан в подземных выработках	–	–	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7
ПА	Аммиак, ацетон, бензол, винил хлористый, кислота уксусная, ксилол, оксид углерода, пропан, растворители Р-4, Р-5, РС-1, толуол, этан и др.	Амилацетат, ангидрид уксусной кислоты, бензин Б 95/130, бутан, винилацетат, изооктан, изопентан, метиламин, растворители Р-40: № 646–649, РС-2, БЭФ, этиловый спирт и др.	Амиловый спирт, бензины: А-72, А-76, Б-70, гексан, гептан, камфен, керосин, нефть сырая, скипидар, триметиламин, уайт-спирит, циклогексан и др.	Альдегид изомасляный, альдегид масляный, альдегид уксусный, декан и др.	–	–
ПВ	Коксовый газ, синильная кислота	Камфорное масло, кислота акриловая, формальдегид, фурфурол, этилен и др.	Акролеин, изопропенилацетилен, сероводород, формальгликоль и др.	Альдегид пропиононовый, дибутиловый эфир, диэтиловый эфир и др.	–	–
ПС	Водород, водяной газ, светильный газ	Ацетилен	Метилдихлорсилан, трихлорсилан	–	Сероуглерод	–

Движение пламени по газовой смеси называется распространением пламени. В зависимости *от скорости распространения пламени* горение может быть диффузионным (несколько метров в секунду), дефлаграционным или взрывным (несколько десятков и сотен метров в секунду) и детонационным (тысячи метров в секунду).

При горении химически неоднородных горючих систем, в которых горючее вещество и воздух не перемешаны и имеют поверхности раздела (например, твердые материалы и жидкости), время диффузии кислорода к горючему веществу намного больше времени, необходимого для протекания химической реакции. В этом случае процесс протекает в диффузионной области, т. е. горение

будет *диффузионным*. Такой вид горения представляют собой все пожары.

Если время физической стадии перемешивания горючих веществ с окислителем намного меньше времени протекания самой химической реакции, то такой процесс горения называют *кинетическим*, и он может протекать в виде взрыва.

Для *дефлаграционного горения* характерна передача тепла от слоя к слою, а пламя, возникающее в нагретой и разбавленной активными радикалами и продуктами реакции смеси, перемещается в направлении исходной горючей смеси. Это объясняется тем, что пламя становится источником, который выделяет непрерывный поток тепла и химически активных частиц. В результате этого фронт пламени перемещается в сторону горючей смеси.

Когда скорость распространения пламени составляет десятки и сотни метров в секунду, но не превышает скорости распространения звука в данной среде (344 м/с в атмосфере при нормальных условиях), происходит взрывное горение или взрыв.

Согласно ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ «Взрывобезопасность. Общие требования», **взрыв** – быстрое экзотермическое химическое превращение взрывоопасной среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов, способных проводить работу.

Взрыв, как правило, приводит к возникновению интенсивного роста давления. В окружающей среде образуется и распространяется ударная волна.

Ударная волна имеет разрушительную способность, если избыточное давление в ней выше 15 кПа. Она распространяется в газе перед фронтом пламени со звуковой скоростью – 330 м/с. При взрыве исходная энергия превращается в энергию нагретых сжатых газов, которая переходит в энергию движения, сжатия и разогрева среды. Возможны различные виды исходной энергии взрыва – электрическая, тепловая, энергия упругого сжатия, атомная, химическая.

*Основными факторами, характеризующими опасность взрыва*, являются: максимальное давление и температура взрыва; скорость нарастания давления при взрыве; давление во фронте ударной волны; дробящие и фугасные свойства взрывоопасной среды.

Общее действие взрыва проявляется в разрушении оборудования или помещения, вызываемом ударной волной, а также в выделении вредных веществ (продуктов взрыва или содержащихся в оборудовании).

**Максимальное давление взрыва** ( $P_{\max}$ ) – наибольшее давление, возникающее при дефлаграционном взрыве газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа.

**Скорость нарастания давления при взрыве** ( $dP/dt$ ) – производная давления взрыва по времени на восходящем участке зависимости давления взрыва газо-, паро-, пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде от времени. При этом различают максимальную и среднюю скорости нарастания давления при взрыве. При установлении максимальной скорости используют приращение давления на прямолинейном участке зависимости давления взрыва от времени, а при определении средней скорости – участок между максимальным давлением взрыва и начальным давлением в сосуде до взрыва.

Обе эти характеристики являются важными факторами для обеспечения взрывозащиты. Их используют при установлении категории помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности, при расчетах предохранительных устройств, при разработке мероприятий по пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов.

При взрывном горении продукты горения могут нагреваться до 1500–3000°C, а давление в закрытых системах достигать 0,6–0,9 МПа.

В определенных условиях взрывное горение может перейти в детонацию, когда скорость распространения пламени превышает скорость звука и может достигать 5000 м/с.

**Детонация** есть процесс химического превращения системы окислитель – восстановитель, представляющий собой совокупность ударной волны, распространяющейся с постоянной скоростью и превышающей скорость звука, и следующей за фронтом зоны химических превращений исходных веществ. Химическая энергия, выделяющаяся в детонационной волне, подпитывает ударную волну, не давая ей затухать.

На взрывоопасных и пожароопасных производствах электроустановки могут служить источниками воспламенения. Например, неправильная эксплуатация или неисправность электрооборудования может привести к его перегреву или появлению искр, которые могут вызвать пожар или взрыв.

В связи с этим Правила устройства электроустановок (ПУЭ) предусматривают *классификацию производственных помещений и наружных установок по взрывоопасным и пожароопасным зонам.*

При этом класс взрывоопасных и пожароопасных зон, в соответствии с которым производится выбор электрооборудования, определяют технологи совместно с электриками проектной или эксплуатирующей организации, исходя из характеристики взрывоопасности и пожароопасности окружающей среды.

**Взрывоопасная зона** – помещение или ограниченное пространство в помещении или наружной установке, в котором имеются или могут образоваться взрывоопасные смеси.

**Взрывоопасная смесь** – смесь с воздухом горючих газов, паров ЛВЖ, горючих пыли или волокон с нижним концентрационным пределом распространения пламени не более 65 г/м<sup>3</sup> при переходе их во взвешенное состояние, которая при определенной концентрации способна взорваться при возникновении источника инициирования взрыва.

ПУЭ устанавливают: если объем взрывоопасной смеси составляет более 5% свободного объема помещения, то все помещение относится к соответствующему классу взрывоопасности.

Если объем взрывоопасной смеси равен или менее 5% свободного объема помещения, то взрывоопасной считается зона в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от технологического аппарата, у которого возможно выделение горючих газов или паров ЛВЖ. Помещения за пределами взрывоопасной зоны считаются невзрывоопасными, если нет других факторов, создающих в нем взрывоопасность.

Согласно ПУЭ, *по содержанию горючих газов и паров легковоспламеняю-*



*щихся жидкостей* предусмотрено три класса взрывоопасных зон помещений (В-I, В-Iа, В-Iб); для наружных установок – один класс (В-Iг); по содержанию взрывоопасных пылей – два класса (В-II и В-IIа). Наиболее опасными являются зоны классов В-I и В-II.

**Зоны класса В-I** – зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются горючие газы или пары ЛВЖ в таком количестве и с такими свойствами, что они могут образовать с воздухом взрывоопасные смеси при нормальных режимах работы, например при загрузке или разгрузке технологических аппаратов, хранении или переливании ЛВЖ, находящихся в открытых емкостях, и т. п.

**Зоны класса В-Iа** – зоны, расположенные в помещениях, в которых при нормальной эксплуатации взрывоопасные смеси горючих газов (независимо от нижнего концентрационного предела воспламенения) или паров ЛВЖ с воздухом не образуются, а возможны только в результате аварий или неисправностей.

**Зоны класса В-Iб** – те же зоны, что и в классе В-Iа, но отличающиеся одной из следующих особенностей:

1) горючие газы в этих зонах обладают высоким нижним концентрационным пределом воспламенения (15% и более) и резким запахом при предельно допустимых концентрациях (например, машинные залы аммиачных компрессорных и холодильных абсорбционных установок);

2) помещения производств, связанных с обращением газообразного водорода, в которых по условиям технологического процесса исключается образование взрывоопасной смеси в объеме, превышающем 5% свободного объема помещения, имеют взрывоопасную зону только в своей верхней части. Взрывоопасная зона условно принимается от отметки 0,75 общей высоты помещения, считая от уровня пола, но не выше кранового пути, если таковой имеется (например, помещения электролиза воды, зарядные станции тяговых и статорных аккумуляторных батарей).

Пункт 2 не распространяется на электромашинные помещения с турбогенераторами с водородным охлаждением при условии обеспечения электромашинного помещения вытяжной вентиляцией с естественным побуждением; эти электромашинные помещения имеют нормальную среду.

К классу В-Iб относятся также зоны лабораторных и других помещений, в которых горючие газы и ЛВЖ имеются в небольших количествах, недостаточных для создания взрывоопасной смеси в объеме, превышающем 5% свободного объема помещения, и в которых работа с горючими газами и ЛВЖ производится без применения открытого пламени. Эти зоны не относятся к взрывоопасным, если работа с горючими газами и ЛВЖ производится в вытяжных шкафах или под вытяжными зонтами.

**Зоны класса В-Iг** – пространства у наружных установок: технологических установок, содержащих горючие газы или ЛВЖ (за исключением наружных аммиачных компрессорных установок), надземных и подземных резервуаров с ЛВЖ или горючими газами (газгольдеры), эстакад для слива и налива ЛВЖ, открытых нефтеловушек, прудов-отстойников с плавающей нефтяной пленкой и т. п.

К зонам класса В-Iг также относятся: пространства у проемов за наружны-

ми ограждающими конструкциями помещений со взрывоопасными зонами классов В-I, В-Ia и В-II (исключение – проемы окон, заполненные стеклоблоками); пространства у наружных ограждающих конструкций, если на них расположены устройства для выброса воздуха из систем вытяжной вентиляции помещений со взрывоопасными зонами любого класса или если они находятся в пределах наружной взрывоопасной зоны; пространства у предохранительных и дыхательных клапанов емкостей и технологических аппаратов с горючими газами и ЛВЖ.

**Зоны класса В-II** – зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются переходящие во взвешенное состояние горючие пыли или волокна в таком количестве и с такими свойствами, что они способны образовать с воздухом взрывоопасные смеси при нормальных режимах работы (например, при загрузке и разгрузке технологических аппаратов).

**Зоны класса В-IIa** – зоны, расположенные в помещениях, в которых опасные состояния, свойственные зонам класса В-II, не имеют места при нормальной эксплуатации, а возможны только в результате аварий или неисправностей.

**Пожароопасной зоной** называется пространство внутри и вне помещений, в пределах которого постоянно или периодически обращаются горючие (сгораемые) вещества и в котором они могут находиться при нормальном технологическом процессе или при его нарушениях.

*ПУЭ подразделяют пожароопасные зоны на следующие классы:*

- **зоны класса П-I** – зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются горючие жидкости с температурой вспышки выше 61°C;

- **зоны класса П-II** – зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются горючие пыли или волокна с нижним концентрационным пределом воспламенения более 65 г/м<sup>3</sup> к объему воздуха;

- **зоны класса П-IIa** – зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества;

- **зоны класса П-III** – расположенные вне помещения зоны, в которых обращаются горючие жидкости с температурой вспышки выше 61°C или твердые горючие вещества.

Во взрывоопасных зонах помещений разрешается устанавливать только взрывозащищенное электрооборудование. В пожароопасных зонах используется электрооборудование закрытого типа, внутренняя полость которого отделена от внешней среды оболочкой.

**Взрывозащищенное электрооборудование** – электротехническое изделие (электротехническое устройство, электрооборудование) специального назначения, которое выполнено таким образом, что устранена или затруднена возможность воспламенения окружающей его взрывоопасной среды вследствие эксплуатации этого изделия.

Согласно ГОСТ 30852.0-2002 «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования», взрывозащищенное электрооборудование подразделяется по уровням и видам взрывозащиты, группам и температурным классам.

Установлены следующие уровни взрывозащиты электрооборудования:

электрооборудование повышенной надежности против взрыва, взрывобезопасное электрооборудование и особовзрывобезопасное электрооборудование.

**Уровень «Электрооборудование повышенной надежности против взрыва»** – взрывозащищенное электрооборудование, в котором взрывозащита обеспечивается только в признанном нормальном режиме работы. Знак уровня – 2.

**Уровень «Взрывобезопасное электрооборудование»** – взрывозащищенное электрооборудование, в котором взрывозащита обеспечивается как при нормальном режиме работы, так и при вероятных повреждениях, определяемых условиями эксплуатации, кроме повреждений средств взрывозащиты. Знак уровня – 1.

**Уровень «Особовзрывобезопасное электрооборудование»** – взрывозащищенное электрооборудование, в котором по отношению к взрывобезопасному электрооборудованию приняты дополнительные средства взрывозащиты, предусмотренные стандартами на виды взрывозащиты. Знак уровня – 0.

Для обеспечения необходимого уровня взрывозащиты в оборудовании используют специальные **виды взрывозащиты**, под которыми понимают конструктивные средства и меры, обеспечивающие невоспламенение окружающей взрывоопасной среды от электрических искр, дуг, пламени, нагретых частей.

Виды взрывозащиты обозначаются латинскими буквами и обозначают следующее:

**o** – масляное заполнение оболочки; все нормально искрящиеся части погружены в минеральное масло либо любой жидкий негорючий диэлектрик, что исключает возможность соприкосновения между ними и взрывоопасными смесями;

**p** – заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением чистым воздухом или инертным газом;

**q** – кварцевое заполнение оболочки;

**d** – взрывонепроницаемая оболочка, которая выдерживает давление взрыва внутри ее и предотвращает распространение взрыва в окружающую взрывоопасную среду через зазоры или отверстия;

**e** – защита вида «е», заключается в том, что в электрооборудовании (или его части), не имеющем нормально искрящихся частей, принят ряд мер, дополнительно используемых в электрооборудовании общего назначения, затрудняющих появление опасных нагревов, искр, дуг;

**i** – искробезопасная электрическая цепь, в которой электрический разряд или нагрев цепи не могут воспламенить окружающую среду. Имеет следующие уровни:

**ia** – опасная ситуация не может возникнуть при нормальной эксплуатации при помехах на линии и при любых комбинациях двух возможных неисправностей;

**ib** – опасная ситуация не может возникнуть при нормальной эксплуатации при помехах на линии и одной неисправности. После главного вида защиты может указываться дополнительной;

**ic** – искробезопасные цепи этого уровня не должны вызывать воспламенение взрывоопасной смеси в стандартных условиях испытаний от теплового воз-

действия и от искрений с вероятностью большей  $10^{-3}$  при нормальной работе и введении всех неучитываемых повреждений, создающих наиболее опасные условия;

**m** – герметизация компаундом. Компаунды – термоактивная, термопластическая полимерная смола (отверждаемая в естественных условиях) и эластомерные материалы с наполнителями и (или) добавками или без них после затвердевания;

**n** – защита вида «n», заключается в том, что при конструировании электрооборудования общего назначения приняты дополнительные меры защиты для того, чтобы в нормальном и некоторых ненормальных режимах работы оно не могло стать источником дуговых и искровых разрядов, а также нагретых поверхностей, способных вызвать воспламенение окружающей взрывоопасной смеси;

**s** – специальный вид взрывозащиты, который отличается от вышеприведенных. Например, токоведущие части залиты эпоксидными смолами и заключены в оболочку под давлением воздуха.

Виды взрывозащиты, обеспечивающие различные уровни взрывозащиты, различаются средствами и мерами обеспечения взрывобезопасности, оговоренными в стандартах на соответствующие виды взрывозащиты.

Взрывозащищенное электрооборудование в зависимости от области применения подразделяется на две группы (табл. 13.4).

Таблица 13.4

**Группы взрывозащищенного электрооборудования по области его применения**

Электрооборудование	Знак группы
Рудничное, предназначенное для подземных выработок шахт и рудников	I
Для внутренней и наружной установки (кроме рудничного)	II

Электрооборудование группы II, имеющее виды взрывозащиты «Взрывонепроницаемая оболочка» и (или) «Искробезопасная электрическая цепь», подразделяется на три подгруппы, соответствующие категориям взрывоопасных смесей согласно табл. 13.5.

Таблица 13.5

**Подгруппы электрооборудования группы II с видами взрывозащиты «Взрывонепроницаемая оболочка» и (или) «Искробезопасная электрическая цепь»**

Знак подгруппы электрооборудования	Категория взрывоопасной смеси, для которой электрооборудование является взрывозащищенным
IIA	IIA
IIВ	IIA и IIВ
IIС	IIA, IIВ и IIС

Электрооборудование группы II в зависимости от значения максимальной температуры поверхности подразделяется на шесть температурных классов, соответствующих группам взрывоопасных смесей (табл. 13.6).

**Температурные классы электрооборудования группы II**

Знак температурного класса электрооборудования	Предельная температура, °С	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 маркировку по взрывозащите электрооборудования группы II в указанной ниже последовательности входят:

- знак уровня взрывозащиты электрооборудования (2, 1 или 0);
- знак Ex, указывающий на соответствие электрооборудования стандартам на взрывозащищенное электрооборудование;
- знак вида взрывозащиты (o, p, q, d, e, ia, ib, ic, m, n или s);
- знак группы или подгруппы электрооборудования (II, IIA, IIB или IIC);
- знак максимальной температуры поверхности, или температурного класса электрооборудования (T1–T6), или же то и другое вместе (например, 350°C(T1)).

Маркировка взрывозащищенного электрооборудования должна выполняться в виде цельного рельефного знака в удобном месте оболочки электрооборудования или на табличке, прикрепляемой к оборудованию. Например, 2ExeIIT3.

В маркировке по взрывозащите могут иметь место дополнительные знаки и надписи в соответствии со стандартами на электрооборудование с отдельными видами взрывозащиты.

Оборудование сохраняет взрывозащиту, если находится в среде со взрывоопасной смесью тех категорий и групп, для которых выполнена его взрывозащита, или в среде со взрывоопасной смесью менее опасной категории и группы. Если в среде присутствует несколько веществ, то выбор электрооборудования производится по наиболее опасному из них.

Согласно требованиям ГОСТ 30852.0-2002 «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования», соответствующие уровни взрывозащиты могут обеспечиваться:

- для электрооборудования повышенной надежности против взрыва (уровень 2):
  - взрывозащитой вида «i» с уровнем искробезопасной электрической цепи «ic» и выше;
  - взрывозащитой вида «r», имеющей устройство сигнализации о недопустимом снижении давления;
  - взрывозащитой вида «q»;
  - защитой вида «e»;
  - взрывозащитой вида «d»;

– масляным заполнением для электрооборудования групп II и заполнением негорючей жидкостью для электрооборудования групп I оболочек, удовлетворяющих требованиям взрывозащиты вида «о»;

- для взрывобезопасного электрооборудования (уровень 1):

- взрывозащитой вида «i»;

- взрывозащитой вида «р», с устройством сигнализации и автоматического отключения напряжения питания;

- взрывозащитой вида «d» для взрывобезопасного электрооборудования;

- специальным видом взрывозащиты «s»;

- защитой вида «е», заключенной во взрывонепроницаемую оболочку;

- заключением в оболочку, предусмотренную для защиты вида «р» с устройством сигнализации о снижении давления ниже допустимого значения электрооборудования группы II с защитой вида «е»;

- для особовзрывобезопасного электрооборудования (уровень 0):

- взрывозащитой вида «i»;

- специальным видом взрывозащиты «s»;

- взрывобезопасным электрооборудованием с дополнительными средствами взрывозащиты (например, заключением искроопасных частей, залитых компаундом или погруженных в жидкий или сыпучий диэлектрик, во взрывонепроницаемую оболочку, или продуванием взрывонепроницаемой оболочки чистым воздухом под избыточным давлением при наличии устройств контроля давления, сигнализации и автоматического отключения напряжения при недопустимом снижении давления или при повреждении взрывонепроницаемой оболочки).

В соответствии с ГОСТ 30852.13-2002 «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 14. Электроустановки во взрывоопасных зонах (кроме подземных выработок)» при выборе электрооборудования для взрывоопасных зон необходимо:

- установить класс взрывоопасной зоны на основе анализа применяемых веществ и материалов, свойств окружающей среды;

- определить категорию и группу взрывоопасной смеси;

- подобрать требуемое исполнение электрооборудования;

- по справочнику найти конкретную марку электрооборудования.

Электрооборудование, особенно с частями, искрящими при нормальной работе, рекомендуется выносить за пределы взрывоопасных зон, если это не вызывает особых затруднений при эксплуатации и не сопряжено с неоправданными затратами. В случае установки электрооборудования в пределах взрывоопасной зоны оно должно удовлетворять требованиям по взрывозащите.

Применение во взрывоопасных зонах переносных электроприемников (машин, аппаратов, светильников и т. п.) следует ограничивать случаями, когда их применение необходимо для нормальной эксплуатации.

Взрывозащищенное электрооборудование, используемое в химически активных, влажных или пыльных средах, должно быть также защищено соответственно от воздействия химически активной среды, сырости и пыли.

Взрывозащищенное электрооборудование, используемое в наружных установках, должно быть пригодно также и для работы на открытом воздухе или иметь устройство для защиты от атмосферных воздействий (дождя, снега, солнечного излучения и т. п.).

Во взрывоопасных зонах классов В-II и В-IIa рекомендуется применять электрооборудование, предназначенное для взрывоопасных зон со смесями горючих пылей или волокон с воздухом.

При отсутствии такого электрооборудования допускается во взрывоопасных зонах класса В-II применять взрывозащищенное электрооборудование, предназначенное для работы в средах со взрывоопасными смесями газов и паров с воздухом, а в зонах класса В-IIa – электрооборудование общего назначения (без взрывозащиты), но имеющее соответствующую защиту оболочки от проникновения пыли.

Применение взрывозащищенного электрооборудования, предназначенного для работы в средах взрывоопасных смесей газов и паров с воздухом, и электрооборудования общего назначения с соответствующей степенью защиты оболочки допускается при условии, если температура поверхности электрооборудования, на которую могут осесть горючие пыли или волокна (при работе электрооборудования с номинальной нагрузкой и без наложения пыли), будет не менее чем на 50°C ниже температуры тления пыли для тлеющих пылей или не более двух третей температуры самовоспламенения для нетлеющих пылей.

Выбор электрооборудования для работы во взрывоопасных зонах производится по табл. 13.7, 13.8.

Таблица 13.7

**Допустимый уровень взрывозащиты электрических машин (стационарных и передвижных) в зависимости от класса взрывоопасной зоны**

Класс взрывоопасной зоны	Уровень взрывозащиты
В-I	Взрывобезопасный
В-Ia, В-Iг	Повышенной надежности против взрыва
В-Iб	Без средств взрывозащиты. Искрящие части машины (например, контактные кольца) должны быть заключены в оболочку
В-II	Взрывобезопасный
В-IIa	Без средств взрывозащиты. Искрящие части машины (например, контактные кольца) должны быть заключены в оболочку

При необходимости допускается обоснованная замена электрооборудования, указанного в таблицах, электрооборудованием с более высоким уровнем взрывозащиты и более высокой степенью защиты оболочки. Например, вместо электрооборудования уровня «Повышенная надежность против взрыва» может быть установлено электрооборудование уровня «Взрывобезопасное» или «Особовзрывобезопасное».

**Допустимый уровень взрывозащиты стационарных электрических  
светильников в зависимости от класса взрывоопасной зоны**

Класс взрывоопасной зоны	Уровень взрывозащиты или степень защиты светильника
В-I	Взрывобезопасный с учетом категории и группы взрывоопасной смеси
В-Ia, В-Iг	Повышенной надежности против взрыва
В-Iб	Без средств взрывозащиты (степень защиты оболочки IP53)
В-II	Повышенной надежности против взрыва. Любой взрывозащищенный
В-IIa	Стационарный (степень защиты оболочки IP53); переносной (повышенной надежности против взрыва)

В зонах, взрывоопасность которых определяется горючими жидкостями, имеющими температуру вспышки выше 61°С, может применяться любое взрывозащитное электрооборудование для любых категорий и групп с температурой нагрева поверхности, не превышающей температуру самовоспламенения данного вещества.

Для предупреждения взрыва необходимо исключать образование взрывоопасной среды и возникновение источника инициирования взрыва.

Предотвращение возникновения источника инициирования взрыва обеспечивается: регламентацией огневых работ, ограничением нагрева оборудования ниже температуры самовоспламенения взрывоопасной смеси; применением неискрящихся материалов, средств защиты от атмосферного и статического электричества, блуждающих токов и т. д.; применением быстродействующих средств защитного отключения возможных источников инициирования взрыва; ограничением мощности электромагнитных и других излучений; устранением опасных тепловых проявлений химических реакций и механических воздействий, применением взрывозащищенного электрооборудования.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Устройство стенда ОТ 17

#### для определения величины тушащего зазора

Стенд состоит из корпуса 6, толстостенного сосуда 2, рассчитанного на давление 10 МПа, системы зажигания горючей смеси, системы для продувания полостей сосудов, предохранительного щитка 5 (рис. 13.3).

Сосуд имеет две полости 2 и 7, каждая объемом 1 л. В перегородке 8, которая разделяет сосуд, установлена втулка 10 с коническим отверстием, имеющим длину 25 мм. В отверстии расположена коническая пробка 9 с резьбой на хвостовике 13. Хвостовик резьбой входит в гайку 14, которая снабжена диском 15 с нанесенными на его поверхность делениями 11. Выхлопной штуцер 1 имеет пластину 12 для закрепления разрывной мембраны 19. Под пластину 12 закладывают листок плотного, но непрочного материала, например кальку, – разрывную мембрану.



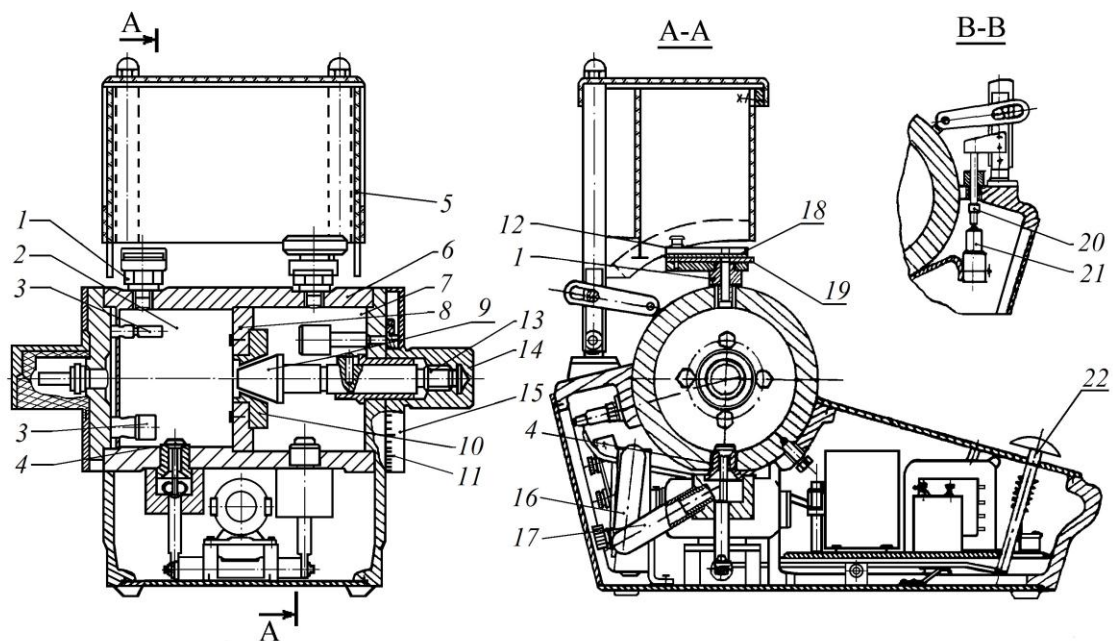


Рис. 13.3. Устройство стенда ОТ 17 для определения величины тушащего зазора:  
 1 – выхлопной штуцер; 2 – левая полость; 3 – выступ; 4 – клапан; 5 – щиток;  
 6 – корпус; 7 – правая полость; 8 – перегородка; 9 – коническая пробка;  
 10 – втулка; 11 – деления диска; 12 – пластина; 13 – хвостовик; 14 – гайка;  
 15 – диск; 16 – вентилятор; 17 – трубопровод; 18 – зажим; 19 – разрывная мембрана; 20 – стержень; 21 – конечный выключатель; 22 – кнопка

Обе полости 2 и 7 посредством клапана 4 соединены трубопроводом 17 с вентилятором 16. Полость 2 имеет два выступа, полость 7 – один 3, назначение их – увеличить поверхность испарения залитой взрывоопасной жидкости.

При заливке очередной порции взрывоопасной жидкости в камеры 2 и 7 необходимо приподнять щиток 5, при этом посредством стержня 20 и конечного выключателя 21 с целью безопасности обслуживания обесточивается система зажигания. Фрикционное торможение щитка в приподнятом положении обеспечивается фрикционными шайбами.

Открывание клапанов 4, продувание камер 2 и 7 производится вручную, нажатием на кнопку 22. При этом открываются клапаны в обе камеры и одновременно включается вентилятор 16 посредством микропереключателя.

## 2.2. Принцип работы стенда

Определенное количество легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) для создания стехиометрической концентрации, например, ацетона, закапывают через отверстие штуцеров 1 в полость сосуда.

При этом жидкость попадает на верхний и нижний выступы 3, растекается по ним, в результате чего происходит интенсивное испарение. По истечении определенного периода времени, достаточного для испарения (2–5 мин), пары ацетона, смешиваясь с воздухом в полостях, заполняют весь объем стенда. Поворотом гайки 14 пробка 9 выводится на определенный размер, образуя концентрический зазор. Величину зазора определяют на диске 15 по делениям 11.

Установка зазора производится поворотом диска 15 только в одну сторону, при этом выбирается люфт в резьбе.

На панели 1 (рис. 13.4) расположены элементы управления.

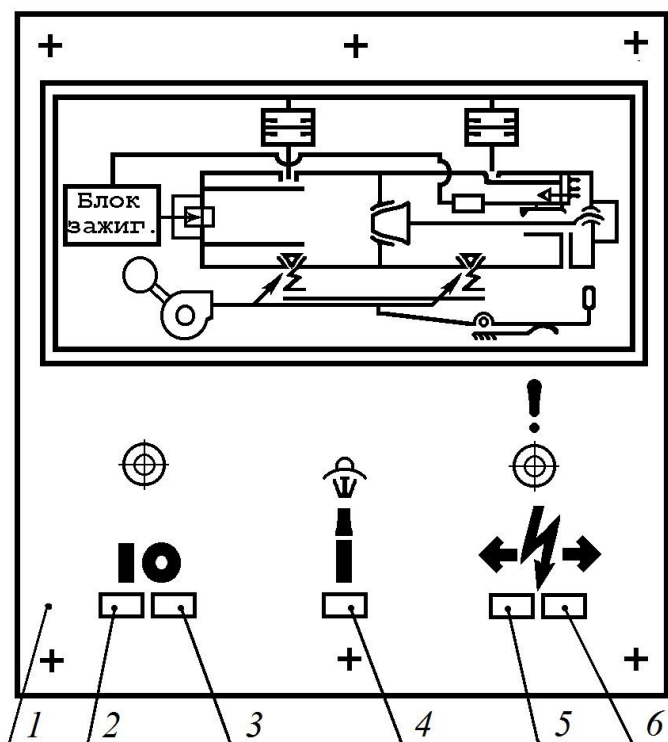


Рис. 13.4. Расположение элементов управления на панели стенда

Включение питания осуществляется кнопкой 2, а отключение – кнопкой 3; включение зажигания в первой камере – кнопкой 5, а во второй – кнопкой 6. Продувка камер осуществляется нажатием кнопки 4. Продолжительность продувки равна длительности нажатия. При нажатии одной из кнопок (5 или 6) происходит воспламенение взрывоопасной смеси (взрыв) в соответствующей камере. Если кольцевой зазор превышает БЭМЗ, то происходит передача пламени в другую камеру и воспламенение в ней взрывоопасной смеси. При зазоре меньшем или равном БЭМЗ взрыв не передается. Контроль процесса воспламенения взрывоопасной смеси осуществляется по разрывной мембране.

### 2.3. Порядок проведения исследований

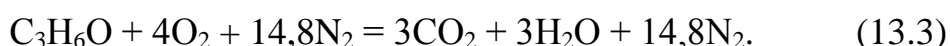
Для проведения исследования процесса тушения пламени в зазоре необходимо: подготовить к работе стенд, изучив его устройство, принцип действия и управления; составить по заданию преподавателя испытываемую смесь; рассчитать стехиометрическую концентрацию выбранной взрывоопасной смеси и величину тушащего зазора; изучить порядок выполнения исследования и строго его придерживаться при проведении опытов; после завершения опытов отключить установку и убрать рабочее место.

1. Рассчитать стехиометрическую концентрацию взрывоопасной смеси и величину тушащего зазора.

Стехиометрическая концентрация  $C_m$ , %, исследуемой взрывоопасной смеси определяется по формуле

$$C_m = \frac{100}{m_{\Gamma} + m_{O_2} + m_{N_2}}, \quad (13.2)$$

где  $m_{\Gamma}$ ,  $m_{O_2}$ ,  $m_{N_2}$  – стехиометрические коэффициенты соответственно горючего, кислорода, азота, находят из уравнения окисления (горения). Уравнение окисления, например для ацетона, имеет вид



Сумма по стехиометрическим коэффициентам равна

$$1 + 4 + 14,8 = 19,8.$$

Тогда стехиометрическая концентрация составит

$$\frac{100}{1 + 4 + 14,8} = \frac{100}{19,8} \approx 5\%.$$

Объем  $V$ , мл, горючей смеси, необходимой для получения стехиометрической смеси в сосуде-стенде, определяется из выражения

$$V = \frac{C_m \cdot M \cdot 10 \cdot V_{\Pi}}{V_{\Gamma-м} \cdot \gamma_{ж}}, \quad (13.4)$$

где  $M$  – молекулярная масса (для ацетона  $M = 58,08$ );  $V_{\Pi}$  – объем полости, л (для ОТ 17 – 1 л);  $V_{\Gamma-м}$  – объем грамм-молекулы, л (принять  $V_{\Gamma-м} = 24,05$  л);  $\gamma_{ж}$  – удельная плотность, г/л (для ацетона  $\gamma_{ж} = 790,8$ ).

Расчетную величину тушащего зазора  $\delta$ , мм, определяют по формуле

$$\delta = \frac{10^3 \cdot P_e \cdot \lambda_0}{v_n \cdot C_{уд} \cdot \rho_0}, \quad (13.5)$$

где  $P_e = 65$  – безразмерный критерий Пекле;  $\lambda_0$  – теплоемкость исходной смеси, Дж/(м · ч · град) (для смеси ацетона с воздухом 20,7);  $v_n$  – нормальная скорость распространения пламени, м/ч (4200);  $C_{уд}$  – удельная теплоемкость исходной смеси, Дж/(кг · град) (для смеси ацетона с воздухом – 0,25);  $\rho_0$  – плотность исходной смеси, кг/м<sup>3</sup> (для смеси ацетона с воздухом – 1360).

2. Откинуть прозрачный предохранительный щиток 5 стенда (рис. 13.3). Залить в камеры сгорания (2 и 7) через штуцеры 1 рассчитанное количество ЛВЖ. Установить над выходными отверстиями штуцеров 1 под пружинящими пластинами 12 листки плотной бумаги (разрывную мембрану). Поворотом гайки 14 в правую сторону установить лимбом против индекса расчетное значение зазора в коническом отверстии между двумя камерами сгорания (2 и 7). Возвратить в исходное положение предохранительный щиток 5 и выждать время (2–5 мин) для равномерного диффузного заполнения камер испарения ЛВЖ. Включить кнопкой 2 (рис. 13.4) общее питание электрической цепи стенда и произвести взрыв в камере сгорания стенда. Нажатием кнопки 5 (рис. 13.4) за-

мыкается цепь зажигания в камере 2 (рис. 13.3). Взрыв в камерах определяется по звуковому эффекту (контрольная мембрана из бумаги разрывается).

3. При передаче взрыва в камеру 7 необходимо уменьшить величину установленного по расчету зазора и повторить опыт. После каждого взрыва произвести вентиляцию камер в течение 15–20 с нажатием кнопки 4. При отсутствии передачи взрыва во вторую камеру произвести в ней воспламенение испытуемой смеси (контрольный взрыв) нажатием кнопки 6. При наличии взрыва в камере 7 расчетный зазор (БЭМЗ) подтверждается экспериментально. Если при подаче напряжения на свечу зажигания смесь во второй полости не воспламенится, опыт считается неудачным, и его результат не учитывается. Экспериментальные исследования проводятся до определения величины БЭМЗ.

Результаты расчетов и замеров заносят в табл. 13.9.

4. Отключить общее питание цепи зажигания стенда нажатием кнопки 3. Убрать рабочее место.

Таблица 13.9

**Результаты расчетного и экспериментального исследования  
взрывоопасной смеси**

№ опыта	Расчетный объем стехиометрической смеси, мл	Расчетная величина тушащего зазора, мм	Число взрывов в полости камеры I	Число проскоков пламени из полости I в полость камеры II	Экспериментальная величина тушащего зазора, мм	Категория взрывоопасной смеси

*Примечание.* При разрыве мембраны в обеих камерах (полостях) в 4-й и 5-й графах таблицы ставится знак «+». Если же во второй полости мембрана не разрушилась, то в графе 5 ставится знак «-».

5. По величине безопасного экспериментального максимального зазора (БЭМЗ), через который не происходит передача взрыва во вторую камеру, устанавливают категорию и группу взрывоопасной смеси (табл. 13.2 и 13.3) и подбирают взрывозащищенное оборудование (записать пример маркировки).

**Контрольные вопросы**

1. Какие среды являются взрывоопасными и какими основными параметрами они характеризуются?
2. Дайте определение температуры вспышки и самовоспламенения, нижнего (верхнего) концентрационного предела распространения пламени, области воспламенения.
3. Какой состав газовой смеси называют стехиометрическим?
4. В каких единицах определяются НКПРП и ВКПРП в зависимости от вида аэрозольных смесей?
5. Какие аэрозольные взрывчатые вещества по НКПРП относят к особо взрывоопасным?

воопасным, взрывоопасным и пожароопасным?

6. Дайте определение температурных пределов распространения пламени. Для каких смесей введена такая характеристика?

7. Какая температура вещества является безопасной при образовании взрывоопасных паровоздушных смесей?

8. Что такое нормальная скорость распространения пламени, минимальная энергия зажигания?

9. При каких условиях зазор между плоскими поверхностями оболочки принят критическим пламегасящим?

10. В зависимости от каких параметров устанавливаются группа и категория взрывоопасных смесей?

11. Какая величина БЭМЗ и МТВ соответствуют категориям ПА, ПВ, ПС?

12. Какая температура самовоспламенения взрывоопасных смесей соответствует группам Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6?

13. Охарактеризуйте основные факторы, характеризующие опасность взрыва.

14. Как классифицируются производственные помещения и наружные установки по взрывоопасным и пожароопасным зонам согласно ПУЭ?

15. Какое электрооборудование называется взрывозащищенным?

16. Как подразделяется взрывозащищенное электрооборудование согласно ГОСТ 30852.0-2002 «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования»?

17. Как производится маркировка взрывозащищенного электрооборудования? Что означают ее элементы?

18. Как осуществляется выбор электрооборудования для взрывоопасных зон?

## Литература

1. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ. – Введ. 01.01.91. – М.: Гос. Ком. по стандартам, 1991. – 156 с.

2. Взрывобезопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. – Введ. 01.01.78. – М.: Государственный комитет по стандартам, 1977. – 8 с.

3. Смесей взрывоопасные. Классификация и методы испытаний: ГОСТ 12.1.011-78. – Введ. 01.07.79. – М.: Гос. Ком. по стандартам, 1979. – 24 с.

4. Электрооборудование взрывозащищенное. Общие требования: ГОСТ 30852.0-2002. – Введ. 01.11.2003. – Минск: Госком. по стандартизации: БелГИСС, 2003. – Ч. 0. – 56 с.

5. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 12. Классификация смесей газов и паров с воздухом по безопасным экспериментальным максимальным зазорам и минимальным воспламеняющим токам: ГОСТ 30852.11-2002. Введ. 01.11.2003. – Минск: Госком. по стандартизации: БелГИСС, 2003. – 16 с.

6. Правила устройства электроустановок: действие в энергетике Республи-

ки Беларусь подтверждено письмом Белэнерго № 31/54 от 02.06.99 г. / Белэнерго. – 6-е изд., перераб. и доп. – Вильнюс: ЗАО «Ксения», 2007. – 640 с.

7. Гармаза, А. К. Охрана труда: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений по специальностям лесного профиля / А. К. Гармаза, И. Т. Ермак, Б. Р. Ладик. – Минск: БГТУ, 2010. – 366 с.