

## Т. ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ

Группа Т58

**Изменение № 1 ГОСТ 12.1.004—91 Система стандартов безопасности труда.  
Пожарная безопасность. Общие требования**

**Принято Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 4 от 21.10.93)**

**Дата введения 1995—01—01**

Вводную часть изложить в новой редакции: «Настоящий стандарт устанавливает общие требования пожарной безопасности к объектам защиты различного назначения на всех стадиях их жизненного цикла: исследование, разработка нормативных документов, конструирование, проектирование, изготовление, строительство, выполнение услуг (работ), испытание, закупка продукции по импорту, продажа продукции (в том числе на экспорт), хранение, транспортирование, установка, монтаж, наладка, техническое обслуживание, ремонт (реконструкция), эксплуатация (применение) и утилизация. Для объектов, не соответствующих действующим нормам, стандарт устанавливает требования к разработке проектов компенсирующих средств и систем обеспечения пожарной безопасности на стадиях строительства, реконструкции и эксплуатации объектов.

Требования стандарта являются обязательными.

Термины, применяемые в стандарте, и их пояснения приведены в приложении 1».

Пункт 2.4 дополнить абзацем (после третьего): «устройством на технологическом оборудовании систем противозрывной защиты метод определения безопасной площади разгерметизации оборудования приведен в приложении 8);».

Приложение 1. Таблица 1. Термин «Объект (объект защиты)» и его пояснение изложить в новой редакции: «Объект защиты» и «Здание, сооружение, помещение, процесс, технологическая установка, вещество, материал, транспортное средство, изделия, а также их элементы и совокупности. В состав объекта защиты входит и человек».

Стандарт дополнить приложением — 8:

*(Продолжение см. с. 18)*

(Продолжение изменения № 1 к ГОСТ 12.1.004—91)

## «ПРИЛОЖЕНИЕ 8

### Метод определения безопасной площади разгерметизации оборудования

Настоящий метод предназначен для определения безопасной площади разгерметизации (такая площадь сбросного сечения предохранительного устройства, вскрытие которой в процессе сгорания смеси внутри оборудования, например, аппарата, позволяет сохранить последний от разрушения или деформации) технологического оборудования, в котором обращаются, перерабатываются или получают горючие газы, жидкости, способные создавать с воздухом или друг с другом взрывоопасные смеси, сгорающие ламинарно или турбулентно во фронтальном режиме. Разгерметизация — наиболее распространенный способ пожаровзрывозащиты технологического оборудования, заключающийся в оснащении его предохранительными мембранами и (или) другими разгерметизирующими устройствами с такой площадью сбросного сечения, которая достаточна для того, чтобы предотвратить разрушение оборудования от взрыва и исключить последующее поступление всей массы горючего вещества в окружающее пространство, т. е. вторичный пожар.

Метод не распространяется на системы, склонные к детонации или объемному самовоспламенению.

#### 1. Сущность метода

Безопасную площадь разгерметизации определяют по расчетным формулам на основе данных о параметрах технологического оборудования, условиях ведения процесса и показателях пожаровзрывоопасности веществ.

Метод устанавливает зависимость безопасной площади разгерметизации от объема и максимально допустимого давления внутри него, давления и температуры технологической среды, термодинамических и термокинетических параметров горючей смеси, условий истечения, степени турбулизации.

#### 2. Формулы для расчета безопасной площади разгерметизации

2.1. Безопасную площадь разгерметизации технологического оборудования с газопаровыми смесями определяют по следующим безразмерным критериальным соотношениям:

$$W \geq \frac{\chi(E_i - 1)}{\sqrt{E_i(\pi_m - 1)}} \quad (158)$$

(Продолжение см. с. 19)

для оборудования, рассчитанного на максимальное относительное давление взрыва  $1 < \pi_m \leq 2$  (при одновременном выполнении условия  $P_m \geq 2P'$  в знаменателе формулы (158) множитель  $(\pi_m - 1)$  отсутствует), и

$$W \geq 0,9 \frac{\chi(\pi_e - \pi_m)}{\sqrt{E_i}} \quad (159)$$

для оборудования, выдерживающего давление взрыва в диапазоне относительных значений  $2 < \pi_m < \pi_e$ .

В формулах (158) и (159) приняты следующие обозначения (индексы  $i, u, e, m$  относятся соответственно к начальным параметрам, параметрам горючей смеси, характеристикам горения в замкнутом сосуде, максимальным допустимым значениям). Комплекс подобия

$$W = \frac{1}{(36\pi_0)^{1/3}} \frac{\mu F}{V^{2/3}} \left( \frac{RT_{ui}}{M_i} \right)^{1/2} \frac{1}{S_{ui}} \quad (160)$$

т. е. представляет собой с точностью до постоянного множителя произведение двух отношений — эффективной площади разгерметизации к внутренней поверхности сферического сосуда равного объема и скорости звука в исходной смеси к начальной нормальной скорости пламени. В выражении для комплекса подобия  $W$  (160):

$\pi_0$  — число «пи»;

$\mu$  — коэффициент расхода при истечении свежей смеси и (или) продуктов сгорания через устройство взрыворазрежения (предохранительная мембрана, клапан, разгерметизатор и т. п.);

$F$  — площадь разгерметизации (сбросного сечения), м<sup>2</sup>;

$V$  — максимальный внутренний объем сосуда, в котором возможно образование горючей газопаровой смеси, м<sup>3</sup>;

$R = 8314$  Дж·кмоль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> — универсальная газовая постоянная;

$T_{ui}$  — температура горючей смеси, К;

$M_i$  — молекулярная масса горючей смеси, кг·кмоль<sup>-1</sup>;

$S_{ui}$  — нормальная скорость распространения пламени при начальных значениях давления и температуры горючей смеси, м·с<sup>-1</sup>.

Другие обозначения в формулах (158) и (159):

$\pi_m = \frac{P_m}{P_i}$  — относительное максимально допустимое давление в аппарате, которое не приводит к его деформации и (или) разрушению;

$P_m$  — абсолютное максимально допустимое давление внутри аппарата, которое не приводит к его деформации и (или) разрушению, Па;

$P_i$  — абсолютное начальное давление горючей смеси в аппарате, при котором происходит иницирование горения, Па;

$P'$  — абсолютное давление в пространстве, в котором происходит истечение, в момент достижения максимального давления взрыва внутри аппарата (атмосфера, буферная емкость и т. п.), Па;

$\pi_e = \frac{P_e}{P_i}$  — относительное максимальное давление взрыва данной горючей смеси в замкнутом сосуде;

$P_e$  — абсолютное максимальное давление взрыва данной горючей смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси  $P_i$ , Па;

$E_i$  — коэффициент расширения продуктов сгорания смеси при начальных значениях давления и температуры;

$\chi$  — фактор турбулизации, представляющий собой в соответствии с принципом Гуи-Михельсона отношение действительной поверхности фронта

(Продолжение см. с. 20)

пламени в аппарате к поверхности сферы, в которую можно собрать продукты сгорания, находящиеся в данный момент времени внутри сосуда.

2.2. Формулы (158) и (159) могут быть использованы как для определения безопасной площади разгерметизации при проектировании оборудования по максимально допустимому относительному давлению взрыва в аппарате  $\pi_m$  (прямая задача), так и для определения максимально допустимого начального давления горючей смеси  $P_i$  в аппарате, рассчитанном на максимальное давление  $P_m$ , с уже имеющимся сбросным люком площадью  $F$ , например при анализе аварий (обратная задача).

2.3. Формулы (158) и (159) охватывают весь диапазон возможных давлений взрыва в оборудовании с различной степенью негерметичности ( $1 < \pi_m \leq \pi_e$ ).

2.4. Формулы (158) и (159) записаны в безразмерных независимых переменных, вытекающих из условия автомодельности процесса развития взрыва в негерметичном сосуде, что делает их более универсальными и наглядными. Максимальное давление взрыва в негерметичном сосуде является инвариантом решения системы уравнений динамики развития взрыва при постоянном отношении фактора турбулизации  $\chi$  к комплексу подобия  $W$ .

Погрешность определения диаметра сбросного сечения по инженерным формулам (158), (159) в сравнении с точным компьютерным решением системы дифференциальных уравнений динамики развития взрыва составляет около 10 %.

### 3. Степень влияния различных параметров на безопасную площадь разгерметизации

3.1. В настоящем методе реализован единый подход к расчету площади сбросного сечения, заключающийся в учете влияния различных параметров и условий на величину безопасной площади разгерметизации посредством соответствующего изменения значения фактора турбулизации.

3.2. Фактор турбулизации — основной параметр, оказывающий определяющее влияние на величину безопасной площади разгерметизации.

Погрешность определения термодинамических параметров —  $E_i$ ,  $\pi_e$ ,  $\gamma_b$ , где  $\gamma_b$  — показатель адиабаты продуктов сгорания смеси, входящих в расчетные формулы (158) и (159), составляет проценты, погрешность определения коэффициента расхода  $\mu$ , молекулярной массы горючей смеси и нормальной скорости распространения пламени составляет десятки процентов. Ошибка в выборе значений объема аппарата, температуры и давления смеси также не превышает процентов или десятков процентов. Погрешность же в определении значения фактора турбулизации может составлять сотни процентов.

3.3. Расчет безопасной площади разгерметизации проводят для наиболее взрывоопасных (околостехиометрических) смесей, если не доказана невозможность их образования внутри аппарата.

### 4. Зависимость фактора турбулизации от условий развития взрыва

4.1. Зависимость фактора турбулизации от условий развития горения может быть представлена формулой

$$\chi = (1 + a_1 V) \left( 1 + a_2 \frac{F}{\sqrt{2/3}} \right) \left( a_3 + a_4 \frac{\pi_e - \pi_m}{\pi_e - 2} \right), \quad (161)$$

в которой эмпирические коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  определяют по табл. 15.

(Продолжение см. с. 21)

## Эмпирические коэффициенты для расчета фактора турбулизации\*

Условия развития горения **	Эмпирические коэффициенты			
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Объем сосуда $V$ до $10 \text{ м}^3$ ; степень негерметичности $F/V^{2/3}$ до $0,25$	0,15	4	1	0
Объем сосуда $V$ до $200 \text{ м}^3$ , $1 < \pi_m < 2$ ;				
начально открытые сбросные сечения	0	0	2	0
начально закрытые сбросные сечения	0	0	8	0
Объем сосуда $V$ до $200 \text{ м}^3$ , $2 \leq \pi_m < \pi_e$ ;				
начально открытые сбросные сечения	0	0	0,8	1,2
начально закрытые сбросные сечения	0	0	2	6
Объем сосуда $V$ до $10 \text{ м}^3$ ; степень негерметичности $F/V^{2/3}$ до $0,04$ ; наличие сбросного трубопровода, $1 < \pi_m < 2$ ;				
без орошения истекающих газов	0	0	4	0
с орошением истекающих газов	0,15	4	1	0

\* Для отсутствующих в таблице условий развития горения, например для оборудования объемом более  $200 \text{ м}^3$ , значение фактора турбулизации определяют экспертно.

\*\* Если в условиях развития горения значение какого-либо параметра не оговорено, то оно может быть любым в допустимом диапазоне.

## 4.2. Влияние объема аппарата

Для полых аппаратов объемом менее  $1 \text{ м}^3$  значение фактора турбулизации  $\chi = 1 \div 2$ .

С ростом объема аппарата значение фактора турбулизации увеличивается и для полых аппаратов объемом около  $10 \text{ м}^3$   $\chi = 2,5 \div 5$  в зависимости от степени негерметичности (отношение  $F/V^{2/3}$ ) аппарата.

Для сосудов объемом до  $200 \text{ м}^3$  различной формы с незначительными встроенными внутрь элементами значение фактора турбулизации не превышает  $\chi = 8$ .

## 4.3. Влияние формы аппарата

Для технологического оборудования с отношением длины к диаметру до 5:1 можно считать, что форма аппарата не влияет на значение фактора турбулизации, так как увеличение поверхности пламени из-за его вытягивания по форме аппарата компенсируется уменьшением поверхности в результате более раннего касания пламенем стенок сосуда.

## 4.4. Влияние начальной герметизации аппарата

Для полых аппаратов объемом до  $200 \text{ м}^3$  с начально открытыми сбросными сечениями, например люками, значение фактора турбулизации не превышает  $\chi = 2$ , для аппаратов с начально закрытыми сбросными сечениями (мембраны, разгерметизаторы и т. д.) не превышает  $\chi = 8$ .

4.5. Влияние степени негерметичности аппарата  $F/V^{2/3}$ 

Увеличение степени негерметичности  $F/V^{2/3}$  в 10 раз (от  $0,025$  до  $0,25$ ), что равнозначно увеличению площади разгерметизации в 10 раз для одного и того же аппарата, приводит к возрастанию фактора турбулизации в 2 раза (для аппаратов объемом около  $10 \text{ м}^3$  с  $\chi = 2,5$  до  $\chi = 5$ ).

(Продолжение см. с. 22)

4.6. Влияние максимально допустимого давления взрыва в аппарате (коррелирует с влиянием давления разгерметизации)

При увеличении относительного максимально допустимого давления взрыва внутри оборудования (прочности оборудования) в диапазоне  $1 < \pi_m \leq 2$  значение фактора турбулизации не изменяется. С ростом относительного максимально допустимого давления взрыва выше  $\pi_m > 2$  (до  $\pi_m = \pi_0$ ) для начально открытых сбросных сечений значение фактора турбулизации снижается с 2 до 0,8, для начально закрытых — с 8 до 2. Этот результат согласуется с физическим представлением о том, что при большем значении давления взрыва, которое выдерживает аппарат, меньше площадь сбросного сечения, а следовательно, фронт пламени подвергается меньшему возмущающему воздействию.

#### 4.7. Влияние условий истечения

Если истечение горючей смеси и продуктов сгорания осуществляется через сбросный трубопровод, расположенный за разгерметизирующим элементом и имеющий диаметр, приблизительно равный диаметру сбросного отверстия, то значение фактора турбулизации вне зависимости от объема сосуда (до  $15 \text{ м}^3$ ) принимают  $\chi = 4$  (для сосудов со степенью негерметичности  $F/V^{2/3}$  около  $0,015 \div 0,035$ , когда оснащение сосудов сбросным трубопроводом оправдано по соотношениям разумного соотношения характерных размеров сосуда и трубопровода) при условии  $\pi_m < 2$ .

При оснащении системы разгерметизации оросителем или другим аналогичным устройством, установленным в трубопроводе непосредственно за разгерметизатором для подачи хладагента в истекающую из аппарата смесь, значение фактора турбулизации принимают таким же, как при истечении непосредственно из аппарата в атмосферу. Эффект интенсификации горения в сосуде при сбросе газов через трубопровод исчезает при увеличении давления разгерметизации до 0,2 МПа при начальном давлении 0,1 МПа.

#### 4.8. Влияние условий разгерметизации

«Мгновенное» вскрытие сбросного сечения повышает вероятность возникновения вибрационного горения внутри аппарата. Амплитуда в акустической волне вибрационного горения может достигать значений  $\pm 0,1$  МПа. Перемешивание смеси, например вентилятором, в процессе развития взрыва приводит к уменьшению амплитуды колебаний давления.

Плавное вскрытие сбросного отверстия, например с помощью малонерционных крышек, снижает значение фактора турбулизации. В тех случаях, когда время срабатывания разгерметизирующего устройства сопоставимо с временем горения смеси в сосуде, при определении безопасной площади разгерметизации необходимо учитывать динамику вскрытия сбросного отверстия.

#### 4.9. Влияние препятствий и турбулизаторов

Вопрос о влиянии различных препятствий на пути распространения пламени и турбулентности в смеси перед фронтом пламени является одним из определяющих в выборе значения фактора турбулизации. Наиболее правильным методом определения значения фактора турбулизации при наличии внутри аппарата сложных препятствий и турбулизованной смеси можно считать метод, основанный на сравнении расчетной и экспериментальной динамики (зависимость давление — время) взрыва.

Ускорение пламени на специальных препятствиях достигает значений  $\chi \approx 15$  и более уже в сосудах объемом около  $10 \text{ м}^3$ .

Для углеводородовоздушных смесей турбулентное распространение пламени с автономной генерацией турбулентности внутри зоны горения характеризуется максимальным значением фактора турбулизации  $\chi = 3 \div 4$ .

(Продолжение см. с. 23)

При искусственно создаваемой изотропной турбулентности максимальное значение фактора турбулизации при точечном зажигании не превышает  $\chi=4\div 6$ . Дальнейшее увеличение степени изотропной турбулентности приводит к гашению пламени.

Для сосудов со встроенными и подвижными элементами, влияние которых на значение фактора турбулизации не может быть в настоящее время оценено, например с использованием литературных данных или экспертным методом, выбор фактора турбулизации должен быть ограничен снизу значением  $\chi=8$ .

#### 4.10. Коэффициент расхода $\mu$

Коэффициент расхода  $\mu$  является эмпирическим коэффициентом, учитывающим влияние реальных условий истечения на величину расхода газа, определенную по известным теоретическим модельным соотношениям.

Для предохранительных мембран и разгерметизирующих устройств с непосредственным сбросом продуктов взрыва в атмосферу, как правило,  $\mu=0,6\div 1$ . При наличии сбросных трубопроводов  $\mu=0,4\div 1$  (включая случай с подачей хладагента в трубопровод непосредственно за мембраной).

Значение коэффициента расхода возрастает в указанном диапазоне с увеличением скорости истечения и температуры истекающего газа, с ростом фактора турбулизации.

Произведение коэффициента расхода на площадь разгерметизации  $\mu F$  представляет собой эффективную площадь разгерметизации.

#### 4.11. Аналог принципа Ле Шателье-Брауна

Согласно критериальному соотношению (158) относительное избыточное давление взрыва

$$(\pi_m - 1) \sim \left( \frac{\chi}{\mu F} \right)^2. \quad (162)$$

Теоретические и экспериментальные исследования процесса сгорания газа в негерметичном сосуде позволили установить аналог принципа Ле Шателье-Брауна: газодинамика горения газа в негерметичном сосуде реагирует на внешнее изменение условий протекания процесса в том направлении, при котором эффект внешнего воздействия ослабляется. Так, увеличение с целью снизить давление взрыва площади разгерметизации  $F$  в 10 раз в сосуде объемом порядка 10 м<sup>3</sup> сопровождается увеличением фактора турбулизации  $\chi$  в 2 раза. Физическое объяснение наблюдаемого явления достаточно простое: с увеличением площади разгерметизации возрастает возмущающее воздействие на фронт пламени.

Избыточное давление взрыва коррелирует согласно критериальному соотношению (162) с отношением  $(\chi/\mu)^2$ , а не просто  $\chi$ . Уменьшение размера ячейки турбулизирующей решетки, приводящее к возрастанию фактора турбулизации в 1,75 раза (с 8 до 14), сопровождается существенно меньшим увеличением отношения  $\chi/\mu$  — лишь в 1,11 раза. Сказанное необходимо учитывать при значениях фактора турбулизации  $\chi \geq 5$ .

## 5. Определение нормальной скорости распространения пламени и термодинамических параметров

5.1. Нормальная скорость характеризует реакционную способность горючих газовых смесей при фронтальных режимах горения. Наиболее перспективным является экспериментально-расчетный метод оптимизации, позволяющий определять нормальную скорость в бомбе постоянного объема в широком диапазоне температур и давлений. Метод изложен в ГОСТ 12.1.044.

Входящее в критериальные соотношения (158) и (159) в составе комплекса значение нормальной скорости распространения пламени  $S_{нi}$  при давлении

(Продолжение см. с. 24)

и температуре, соответствующих началу развития взрыва, может быть определено экспериментально на аттестованном оборудовании или взято из научно-технической литературы, прошедшей оценку достоверности приведенных в ней данных. Если данные о нормальной скорости при характерных для технологического процесса давлении  $P$  и температуре  $T$  отсутствуют, то в ограниченном диапазоне экстраполяции можно воспользоваться для оценки формулой

$$S_u = S_{u0} \left( \frac{P}{P_0} \right)^n \left( \frac{T}{T_0} \right)^m, \quad (163)$$

где  $S_{u0}$  — известное значение нормальной скорости при давлении  $P_0$  и температуре  $T_0$ ;

$n$  и  $m$  — соответственно барический и температурный показатели.

В диапазоне давлений  $0,04 \div 1,00$  МПа и температур  $293 \div 500$  К для стехиометрических смесей метана, пропана, гексана, гептана, ацетона, изопропанола и бензола с воздухом значение барического показателя с ростом давления и температуры свежей смеси увеличивается и лежит в интервале  $-0,5 \div 0,2$ , а значение температурного показателя уменьшается и находится в диапазоне  $3,1 \div 0,6$ . При значениях давления и температуры, близких к атмосферным, значения барического и температурного показателя для горючих газопаровоздушных смесей могут быть приняты в первом приближении соответственно  $n = -0,5$  и  $m = 2,0$ .

Б.2. Термодинамические параметры  $E_i$ ,  $\pi_e$ ,  $\gamma_b$  определяют путем термодинамического расчета, например на компьютерах, по известным методикам.

Значение коэффициента расширения по определению

$$E_i = \frac{M_i T_{bi}}{M_b T_{ui}},$$

где  $T_{bi}$  и  $M_{bi}$  — соответственно температура и молекулярная масса продуктов сгорания горючей смеси при начальных давлении и температуре. Молекулярную массу смеси идеальных газов определяют по формуле

$$M = \sum_j M_j n_j, \quad (164)$$

где  $M_j$  и  $n_j$  — соответственно молекулярная масса и молярная доля  $j$ -го компонента смеси.

Значения коэффициента расширения могут быть также определены из приближенного уравнения

$$E_i = 1 + \frac{\pi_e - 1}{\gamma_b}. \quad (165)$$

В табл. 16 приведены рассчитанные на компьютере значения термодинамических параметров для некоторых стехиометрических газопаровых смесей в предположении, что продукты сгорания состоят из следующих 19 компонентов в газовой фазе:  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $HCN$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $OH$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$ ,  $HNO_3$ . Стехиометрическую концентрацию горючего  $\varphi_{ст}$  в воздухе средней влажности определяли по известной формуле

$$\varphi_{ст} = \frac{100}{4,8445\beta + 1}, \quad (166)$$

где  $\beta$  — стехиометрический коэффициент, равный количеству молекул кислорода, необходимых для сгорания молекулы горючего.

(Продолжение см. с. 25)

Таблица 16

Результаты расчета значений  $\pi_e$ ,  $\gamma_b$ ,  $E_i$ ,  $T_{bi}$  и экспериментальные значения нормальной скорости  $S_u$  для некоторых стехиометрических газопаровых смесей при начальном давлении 0,1 МПа и температуре 298,15 К

Горючее	Формула	$\varphi_{ст}$ , % об.	$\pi_e$	$\gamma_b$	$E_i$	$T_{bi}$	$S_u$ , м·с <sup>-1</sup>
Метан	CH <sub>4</sub>	9,355	8,71	1,25	7,44	2204	0,305
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3,954	9,23	1,25	7,90	2245	0,32
n-Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	2,126	9,38	1,25	8,03	2252	0,29
n-Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	1,842	9,40	1,25	8,05	2253	0,295
Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	4,907	3,28	1,25	7,96	2242	0,315
Изопропанол	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	4,386	9,34	1,24	8,00	2220	0,295
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	2,679	9,30	1,25	7,99	2221	0,36

Для многокомпонентных смесей и смесей, проведение расчетов по которым по тем или иным причинам вызывает трудности, определение максимального относительного давления взрыва  $\pi_e$ , а следовательно, и коэффициента расширения  $E_i$  по формуле (165) проводят по соответствующей методике ГОСТ 12.1.044.

### 6. Влияние сбросных трубопроводов

6.1. Сбросные трубопроводы используются для отвода продуктов горения в безопасное место, например в приемную буферную емкость или за территорию цеха, что позволяет существенно снизить вероятность возникновения внутри производственных помещений вторичных пожаров и взрывов, ущерб от которых значительно выше, чем потери от первичных взрывов.

6.2. Наличие сбросного трубопровода может приводить к значительному (на порядок) увеличению избыточного давления взрыва в сравнении со случаем разгерметизации аппарата непосредственно в атмосферу. Характерное значение фактора турбулизации при использовании сбросного трубопровода с диаметром, равным диаметру предохранительной мембраны, и без орошения истекающих газов хладагентом  $\chi=4$  вне зависимости от объема защищаемого полого оборудования с нетурбулизованной смесью.

Прочностные характеристики сбросного трубопровода должны быть не ниже соответствующих характеристик защищаемого аппарата.

6.3. При проектировании систем сброса газообразных продуктов в случае взрыва газопаровых смесей внутри технологического оборудования необходимо принимать во внимание возможность интенсивного догорания эвакуируемой смеси в сбросном трубопроводе, являющегося причиной турбулизации горения внутри защищаемого объема.

Наилучший способ ликвидировать эффект увеличения давления взрыва при наличии в системе противозрывной защиты технологического оборудования методом разгерметизации сбросного трубопровода — подача хладагента с интенсивностью  $0,1 \div 0,5) 10^{-2}$  м<sup>3</sup>·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> в поперечное сечение трубопровода непосредственно за мембраной до ее срабатывания или одновременно с ним. При наличии орошения в трубопроводе и использовании приемной емкости, находящейся под разрежением, длина трубопровода (по результатам экспериментов до 30 м) не оказывает заметного влияния на максимальное давление взрыва.

Увеличение давления разгерметизации до  $\sim 0,2$  МПа (при начальном дав-

(Продолжение см. с. 26)

лении технологической среды 0,1 МПа) также приводит к исчезновению эффекта интенсификации взрыва.

Увеличение диаметра сбросного трубопровода относительно диаметра сбросного сечения способствует снижению воздействия данного эффекта интенсификации взрыва.

## 7. Примеры расчетов

Пример 1. Полный технологический аппарат объемом 12 м<sup>3</sup> рассчитан на максимальное избыточное давление 0,2 МПа (абсолютное давление 0,3 МПа) и предназначен для работы при атмосферном давлении с содержащей ацетон реакционной массой. Аппарат имеет рубашку обогрева (80 °С). Необходимо определить безопасную площадь разгерметизации.

Нормальная скорость распространения пламени наиболее опасной около-стехиометрической ацетона-воздушной смеси при атмосферном давлении и температуре (298 К) составляет 0,32 м·с<sup>-1</sup>. Следовательно, при температуре в аппарате 80 °С (353 К) максимальное значение нормальной скорости распространения пламени в соответствии с формулой (163)

$$S_{ui} = 0,32(353/298)^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cong 0,45 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Для стехиометрической ацетона-воздушной смеси  $\pi_e = 9,28$ ;  $E_i = 7,96$ ;  $M_i = (58 \times 0,05 + 28 \times 0,95) \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1} = 29,5 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ . Поскольку  $\pi_m = 0,3 \text{ МПа}/0,1 \text{ МПа} = 3$  превышает значение 2, то для вычисления безопасной площади разгерметизации воспользуемся критериальным соотношением (159). Выражение для комплекса подобия  $W$  в соответствии с формулой (160) и определенных значениями  $S_{ui}$  и  $M_i$  может быть записано в виде

$$W = \frac{1}{(36 \times 3,14)^{1/3}} \cdot \frac{\mu F}{12^{2/3}} \cdot \left( \frac{8314 \times 353}{29,5} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{0,45} \cong 28 \mu F,$$

где  $F$  измеряют в м<sup>2</sup>.

Следовательно, критериальное соотношение (159) относительно  $F$  можно записать в виде

$$F \geq \frac{\chi}{\mu} \cdot \frac{0,9}{28} \cdot \frac{9,28-3}{\sqrt{7,95}} = 0,07 \frac{\chi}{\mu} \text{ м}^2.$$

С увеличением степени негерметичности сосуда объемом около 10 м<sup>3</sup>  $F/V^{2/3}$  от 0,025 до 0,25 значение фактора турбулизации возрастает от 2,5 до 5. Предположим, что  $\chi = 2,5$  при  $\mu = 1$ . При этом минимальная площадь разгерметизации  $F = 0,175 \text{ м}^2$ , а значит  $F/V^{2/3} = 0,03$ . Последнее подтверждает, что значение фактора турбулизации выбрано правильно. Действительно, если бы мы предположили, что  $\chi = 5$ , то получили бы слишком низкое для такой степени турбулизации значение  $F/V^{2/3} = 0,06$  (вместо 0,25). Итак, безопасная площадь разгерметизации составляет в данном случае 0,175 м<sup>2</sup>, что равнозначно сбросному отверстию диаметром 0,47 м.

Пример 2. Сосуд объемом 4 м<sup>3</sup> без встроенных внутрь элементов для хранения бензола, рассчитанный на максимальное абсолютное давление 0,2 МПа, необходимо оснастить надежной системой сброса давления взрыва с отводом продуктов взрыва по трубопроводу в безопасное место.

Для бензола-воздушной смеси стехиометрического состава при атмосферных условиях  $S_{ui} = 0,36 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $E_i = 7,99$ ;  $M_i = (78 \times 0,027 + 28 \times 0,973) \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1} = 29,35 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ . Для систем разгерметизации со сбросным трубопроводом без орошения истекающих продуктов хладагентом вне зависимости от объема сосу-

(Продолжение см. с. 27)

да  $\chi=4$ . Так как  $\pi_m=0,2$  МПа/0,1 МПа=2, то расчет площади разгерметизации проводим по критериальному соотношению (158). Выбрав в качестве значения коэффициента расхода  $\mu=0,4$ , получаем выражение

$$F \geq \frac{(36 \times 3,14)^{1/3} \times 6^{2/3} \left( \frac{29,35}{8314 \times 298} \right)^{1/2} \times 0,36}{0,4} \times \frac{4(7,99-1)}{\sqrt{7,99(2-1)}} = 0,37 \text{ м}^2,$$

т. е. диаметр сбросного трубопровода должен составлять около 0,7 м, что слишком много для сосуда, эквивалентный диаметр которого (диаметр сферы объемом 4 м<sup>3</sup>) 1,97 м.

Поэтому система сброса давления, включая трубопровод, должна быть снабжена системой орошения. При этом может быть принято  $\chi=1,5$ , а значит, как нетрудно вычислить, диаметр сбросного трубопровода будет равен 0,4 м, что вполне приемлемо для данного сосуда, рассчитанного на достаточно низкое давление.

Пример 3. Реактор вместимостью 6 м<sup>3</sup>, в котором возможно образование изопропанола-воздушной стехиометрической смеси при давлении 0,2 МПа, содержит сложные вращающиеся детали. Требуется определить безопасную площадь разгерметизации при условии, что реактор рассчитан на избыточное давление 0,4 МПа (абсолютное давление 0,5 МПа).

Так как  $\pi_m=0,5$  МПа/0,2 МПа=2,5 больше 2, то расчет ведем по формуле (159). Для стехиометрической изопропанола-воздушной смеси  $M_i=(60 \times 0,044 + 28 \times 0,956) \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1} = 29,4 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;  $S_{ui}=0,295(0,2/0,1)^{-0,5} = 0,21 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\pi_e=9,3$ ;  $E_i=8,0$ . Поскольку влияние встроенных деталей на турбулизацию однозначно неизвестно и объем реактора относительно невелик, выбираем значение  $\chi=8$ . При значении коэффициента расхода  $\mu=1$  имеем

$$F \geq \frac{(36 \times 3,14)^{1/3} \times 6^{2/3} \left( \frac{29,4}{8314 \times 298} \right)^{1/2} \times 0,21}{1} \times 0,9 \times \frac{8(9,3-2,5)}{\sqrt{8}} \cong 0,2 \text{ м}^2.$$

(Продолжение см. с. 28)

Отсюда нетрудно вычислить, что диаметр предохранительной мембраны должен быть равен 0,5 м.

Пример 4 (обратная задача). В лабораторном сосуде объемом 0,01 м<sup>3</sup>, рассчитанном на давление 2,0 МПа и имеющем сбросное отверстие для установки предохранительной мембраны диаметром 2,5 см, проводят исследования по определению нормальных скоростей распространения пламени для стехиометрических метано-воздушных смесей при различных давлениях. Требуется определить, до какого максимального начального давления можно подавать в сосуд горючую смесь, чтобы после ее воспламенения в центре сосуда давление взрыва не превысило допустимого давления 2,0 МПа.

Так как с ростом давления нормальная скорость падает, то с некоторым запасом в качестве  $S_{ui}$  выбираем значение 0,305 м·с<sup>-1</sup>, полученное для атмосферного давления. Для стехиометрической метано-воздушной смеси  $M_i = (16 \times 0,094 + 20 \times 0,906)$  кг·кмоль<sup>-1</sup> = 26,9 кг·кмоль<sup>-1</sup>;  $E_i = 7,4$ ;  $\pi_e = 8,7$ . Значения фактора турбулизации и коэффициента расхода могут быть приняты соответственно  $\chi = 1$  и  $\mu = 0,8$ .

Искомое значение начального давления взрыва в сосуде входит в значение  $\pi_m = P_m/P_i$ , причем  $P_m = 2,0$  МПа в соответствии с условиями задачи. Записанное относительно  $\pi_m$  критериальное соотношение (159) принимает вид

$$\pi_m \geq \pi_e - \frac{W\sqrt{E_i}}{0,9\chi},$$

за следовательно, максимально допустимое начальное давление горючей смеси в сосуде

$$\pi_e - \left( \frac{W\sqrt{E_i}}{0,9\chi} \right)^{-1} = 2,0 \text{ МПа} \left( 8,7 - \frac{1,775\sqrt{7,4}}{0,9} \right)^{-1} = 0,6 \text{ МПа},$$

т. е. не должно превышать 0,6 МПа».

(ИУС № 1 1995 г.)