

# Приложение 8 Метод определения безопасной площади разгерметизации оборудования

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8

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:

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

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

$$W = \frac{1}{(26 \pi_0)^{1/3}} \frac{\mu F}{V^{2/3}} \left( \frac{R T_{ш}}{M_i} \right)^{1/2} \frac{1}{S_{ш}}, \quad (160)$$

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·К - универсальная газовая постоянная;

$T_{ш}$  - температура горючей смеси, К;

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

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

Для 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 Гун-Михельсона отношение действительной поверхности фронта 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 автономности 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

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

в которой эмпирические коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  определяют по табл. 18.

Таблица 18

##### Эмпирические коэффициенты для расчета фактора турбулизации\*

\* Для отсутствующих в таблице условий развития горения, например для оборудования объемом более 200 м<sup>3</sup>, значение фактора турбулизации определяют экспериментально.

Условия развития горения*	Эмпирические коэффициенты			
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Объем сосуда $V$ до 10 м <sup>3</sup> ; степень негерметичности $K/V^{2/3}$ ** до 0,25	0,15	4	1	0
Объем сосуда $V$ до 200 м <sup>3</sup> , $1 < \pi_m < 2$ :				
начально открытые сбросные сечения	0	0	2	0
начально закрытые сбросные сечения	0	0	8	0
Объем сосуда $V$ до 200 м <sup>3</sup> , $2 \leq \pi_m < \pi_e$ :				
начально открытые сбросные сечения	0	0	0,8	1,2
начально закрытые сбросные сечения	0	0	2	6
Объем сосуда $V$ до 10 м <sup>3</sup> ; степень негерметичности $P/V^{2/3}$ 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

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

\*\* Текст соответствует оригиналу. - Примечание изготовителя базы данных.

#### 4.2. Влияние объема аппарата

Для полых аппаратов объемом менее 1 м<sup>3</sup> значение фактора турбулизации  $\chi = 1 + 2$ .

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

Для сосудов объемом до 200 м<sup>3</sup> 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 м<sup>3</sup> 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

Увеличение степени негерметичности  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 м<sup>3</sup> с  $\chi = 2,5$  до  $\chi = 5$ ).

#### 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  $\pi_m = \pi_e$ ) 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 физическими предположениями о том, что при большом 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 соображениям 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  $0,2 \text{ МПа}$  при начальном давлении  $0,1 \text{ МПа}$ .

#### 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  $\pm 0,1 \text{ МПа}$ . Перемешивание смеси, например вентилятором, в процессе развития взрыва приводит к уменьшению амплитуды колебаний давления.

Главное вскрытие сбросного отверстия, например с помощью малоинерционных крышек, снижает значение фактора турбулизации. В тех случаях, когда время срабатывания разгерметизирующего устройства соизмеримо 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  $\chi = 3 \div 4$ .

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  $10 \text{ м}^3$  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  $W$  значение нормальной скорости распространения пламени  $S_{st}$  при давлении 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

$$S_{st} = S_{st0} \left( \frac{P}{P_0} \right)^n \left( \frac{T}{T_0} \right)^m \quad (163)$$

где  $S_{st0}$  - известное значение нормальной скорости при давлении  $P_0$  и температуре  $T_0$ ;

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

В диапазоне давлений  $0,04 \div 1,00 \text{ МПа}$  и температур  $293 \div 500 \text{ К}$  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 показателей для горючих газопаровоздушных смесей могут быть приняты в первом приближении соответственно  $n = -0,5$  и  $m = 2,0$ .

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

Значение коэффициента расширения по определению

$$E_i = \frac{M_i T_{bi}}{M_{bi} T_{st}}$$

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.19 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.

Таблица 19

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

Горючее	Формула	$\varphi_{ст},$ об.	%	$\pi_a$	$\gamma_b$	$E_i$	$T_{bi}$	$S_{ul},$ 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>	3,964		9,23	1,25	7,90	2245	0,32
н-Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	2,126		9,38	1,25	8,03	2252	0,29
н-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		9,28	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	2321	0,36

Для многокомпонентных смесей и смесей, проведение расчетов по которым по тем или иным причинам вызывает трудности, определение максимального относительного давления взрыва  $\pi_a$ , 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 полового 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 противовзрывной защиты технологического оборудования методом разгерметизации сбросного трубопровода - подача хладагента с интенсивностью  $(0,1 \div 0,5) 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  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 ~0,2 МПа (при начальном давлении 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 на интенсификацию 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 околостехиометрической ацетон-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)

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

Для стехиометрической ацетон-воздушной смеси  $\pi_a=9,28; E_i=7,96; M_i=(58 \times 0,05 + 28 \times 0,95) \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1} = 29,5 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ . 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 определенными значениями  $S_{ul}$  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  $10 \text{ м}^3$   $F/Y^{2/3}$  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  $F/Y^{2/3}=0,03$ . 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  $F/Y^{2/3}=0,06$  (вместо 0,25). Итак, безопасная площадь разгерметизации составляет в данном случае  $0,175 \text{ м}^2$ , что равнозначно сбросному отверстию диаметром  $0,47 \text{ м}$ .

Пример 2. Сосуд объемом  $4 \text{ м}^3$  без встроенных внутрь элементов для хранения бензола, рассчитанный на максимальное абсолютное давление  $0,2 \text{ МПа}$ , 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  $S_{st}=0,36 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $E_1=7,99$ ;  $M_1=(78 \times 0,027 + 28 \times 0,973) \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}=29,35 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ . Для систем разгерметизации со сбросным трубопроводом без орошения истекающих продуктов хладагентом вне зависимости от объема сосуда  $\chi=4$ . Так как  $\pi_m=0,2 \text{ МПа}/0,1 \text{ МПа}=2$ , то расчет площади разгерметизации проводим по критериальному соотношению (158). Выбрав в качестве значения коэффициента расхода  $\mu=0,4$ , получаем выражение

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

т.е. диаметр сбросного трубопровода должен составлять около  $0,7 \text{ м}$ , что слишком много для сосуда, эквивалентный диаметр которого (диаметр сферы объемом  $4 \text{ м}^3$ )  $1,97 \text{ м}$ .

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  $0,4 \text{ м}$ , что вполне приемлемо для данного сосуда, рассчитанного на достаточно низкое давление.

Пример 3. Реактор вместимостью  $6 \text{ м}^3$ , в котором возможно образование изопропаноло-воздушной стехиометрической смеси при давлении  $0,2 \text{ МПа}$ , содержит сложные вращающиеся детали. Требуется определить безопасную площадь разгерметизации при условии, что реактор рассчитан на избыточное давление  $0,4 \text{ МПа}$  (абсолютное давление  $0,5 \text{ МПа}$ ).

Так как  $\pi_m=0,5 \text{ МПа}/0,2 \text{ МПа}=2,5$  больше 2, то расчет ведем по формуле (159). Для стехиометрической изопропаноло-воздушной смеси  $M_1=(60 \times 0,044 + 28 \times 0,956) \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}=29,4 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;  $S_{st}=0,295(0,2/0,1)^{-0,5}=0,21 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\pi_d=9,3$ ;  $E_1=8,0$ . Поскольку влияние встроенных деталей на турбулизацию однозначно неизвестно и объем реактора относительно невелик, выбираем значение  $\chi=8$ . При значении коэффициента расхода  $\mu=1$  имеем

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

Отсюда нетрудно вычислить, что диаметр предохранительной мембраны должен быть равен  $0,5 \text{ м}$ .

Пример 4 (обратная задача). В лабораторном сосуде объемом  $0,01 \text{ м}^3$ , рассчитанном на давление  $2,0 \text{ МПа}$  и имеющем сбросное отверстие для установки предохранительной мембраны диаметром  $2,5 \text{ см}$ , 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  $2,0 \text{ МПа}$ .

Так как с ростом давления нормальная скорость падает, то с некоторым запасом в качестве  $S_{st}$  выбираем значение  $0,305 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , полученное для атмосферного давления. Для стехиометрической метано-воздушной смеси  $M_1=(16 \times 0,094 + 20 \times 0,906) \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}=26,9 \text{ кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$ ;  $E_1=7,4$ ;  $\pi_d=8,7$ . 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  $\pi_m = P_m / P_1$ , причем  $P_m=2,0 \text{ МПа}$  в соответствии с условиями задачи. Записанное относительно  $\pi_m$  критериальное соотношение (159) принимает вид

$$\left[ \frac{W \sqrt{E_1}}{0,9 \chi} \right]^{-1} = 2,0 \text{ МПа} \left[ 8,7 - \frac{1,775 \sqrt{7,4}}{0,9} \right]^{-1} = 0,6 \text{ МПа},$$

а следовательно, максимально допустимое начальное давление горючей смеси в сосуде

$$\pi_m = \left[ \frac{W \sqrt{E_1}}{0,9 \chi} \right]^{-1} = 2,0 \text{ МПа} \left[ 8,7 - \frac{1,775 \sqrt{7,4}}{0,9} \right]^{-1} = 0,6 \text{ МПа},$$

т.е. не должно превышать  $0,6 \text{ МПа}$ .

(Введено дополнительно, Изм. N 1).