

ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЙ

Анализируются технические решения по повышению взрывоустойчивости зданий взрывоопасных предприятий, методики расчёта предохранительных конструкций, обеспечивающих снижение взрывоопасных концентраций горючих смесей при их образовании и вероятности аварийных взрывов.

Ключевые слова: взрывоопасные производства, взрывоустойчивость зданий.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 22 мая 2017 г.

Помещения, при эксплуатации которых возможны аварийные взрывы, принято называть **помещениями взрывоопасных производств**. Мероприятия, направленные на повышение взрывоустойчивости помещений и зданий, можно разделить на конструктивные и технологические [1].

Конструктивные мероприятия направлены на исключение опасностей перерастания дефлаграционного горения в детонационное за счет выброса части массы взрывоопасной смеси за пределы помещения.

Технологические мероприятия имеют целью снизить взрывоопасную концентрацию горючих смесей за счет принудительной вентиляции помещений или ограничения их образования.

Технические решения по повышению взрывоустойчивости зданий взрывоопасных предприятий

Известно, что давление в замкнутом объёме при горении смесей повышается пропорционально объёму газа, образовавшегося за время горения. В результате истечения газа через проемы максимальное давление в помещении уменьшается (рис. 1). При взрывном горении большинства горючих смесей максимальное давление в замкнутом объёме может достигать 0,7-1,0 МПа. Такое давление создает нагрузки, существенно превышающие несущую способность конструкций (стен, перекрытий) промышленных зданий.

Основными способами повышения взрывобезопасности зданий являются [1-4]: соблюдение требований мер безопасности при разработке технологических процессов и использование предохранительных конструкций; контроль за состоянием технологического оборудования и уборкой горючих пылей в помещениях; изоляция источников образования искр, открытого огня и т.п., которые могут быть источниками воспламенения горючих газозводушных смесей.

На рис. 2 показаны принципы повышения взрывобезопасности зданий, а на рис. 3 – классификация предохранительных конструкций, используемых в практике проектирования промышленных предприятий.

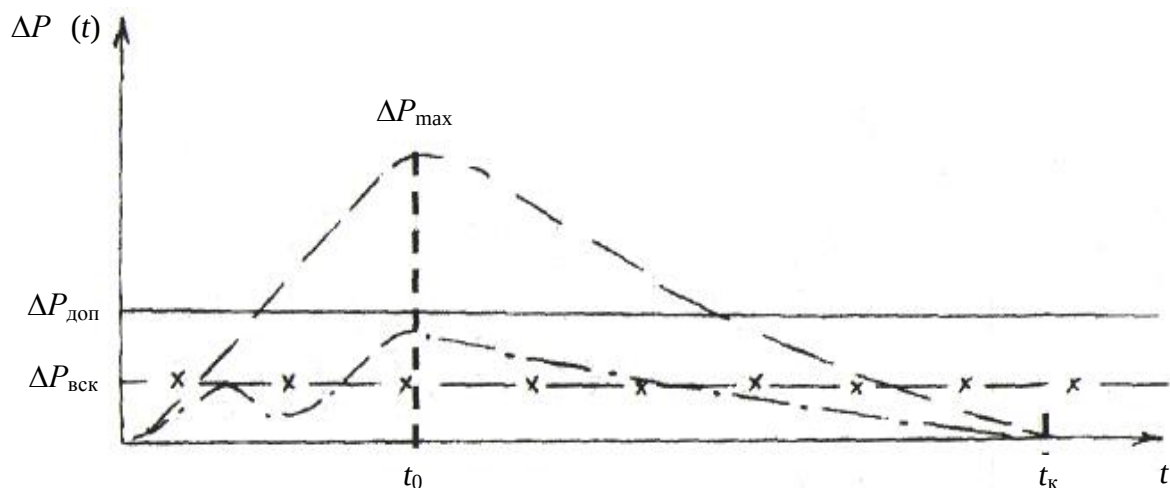


Рис. 1. Характер изменения давления ΔP от времени t при горении горючих смесей внутри помещения:

$\Delta P_{\text{вск}}$ – давление, вызывающее вскрытие предохранительных конструкций;

$\Delta P_{\text{доп}}$ – допустимое давление в помещении ($\Delta P_{\text{доп}} = 5 \text{ кПа}$);

ΔP_{max} – давление при взрывном горении в помещениях с обычными проемами



Рис. 2. Принципы повышения взрывобезопасности зданий



Рис. 3. Классификация предохранительных конструкций

Предохранительные конструкции вскрываются при сравнительно небольшом избыточном давлении и обеспечивают возможность интенсивного истечения газа (продуктов горения и непрореагировавшей части горючей смеси) через образовавшиеся проемы из помещения в наружную атмосферу, что приводит к снижению давления в помещении (рис. 1). Степень снижения давления зависит от площади предохранительных конструкций, закономерностей вскрытия, вида горючей смеси, характера загазованности помещения, его объемно-планировочного решения и других факторов. Рассмотрим технические решения основных видов предохранительных конструкций.

Интересное применение в качестве предохранительной конструкции получило **остекление помещений**, при этом стекла устанавливаются как в стенах здания в виде оконных переплетов, так и в фонарях на покрытии сооружения. В последнем случае, наряду с вертикальным, может использоваться наклонное и горизонтальное остекление. Образование проемов в оконных переплетах и фонарях происходит в результате разрушения остекления под действием избыточного давления, возникающего в помещении при взрывном горении горючей смеси. Закономерности вскрытия остекления зависят от размеров стекол, их толщины, условий закрепления и вида остекления (одинарное, двойное, тройное).

Имеются предохранительные конструкции *в виде облегчённых сбрасываемых стеновых панелей*. Эти панели крепятся к каркасу здания так, чтобы при небольшом избыточном давлении, возникающем в помещении при взрывном горении горючей смеси, обеспечивалось разрушение креплений и отделение панелей от каркаса. В результате сброса стеновых панелей ликвидируется часть наружного ограждения помещения.

В покрытиях сооружения предохранительные конструкции могут устраиваться в виде облегченных плит, перекрывающих проемы. Освобождение этих проемов осуществляется в результате подъема плит под действием нагрузки, возникающей при взрывном горении горючей смеси.

Перечисленные предохранительные конструкции относят к *разрушающимся* конструкциям. *Неразрушающиеся предохранительные конструкции* могут быть *вращающимися* (рис. 4), если образование проёма в наружном ограждении помещения происходит в результате поворота предохранительной конструкции, и *сдвигающимися* (рис. 5), если образование проема в наружном ограждении помещения происходит в результате поступательного движения предохранительной конструкции.

Вскрытие неразрушающихся предохранительных конструкций происходит в результате срабатывания специальных крепежных устройств, с использованием которых предохранительные конструкции находятся в закрытом положении. Закономерности вскрытия неразрушающихся предохранительных конструкций определяются характером их движения под действием нагрузки, возникающей при взрывном горении в помещении.

В виде неразрушающихся предохранительных конструкций могут быть выполнены и оконные переплеты с открывающимися створками. Створки крепятся к оконным рамам вертикальным или горизонтальным (верхним или нижним) шарниром к специальным запорным устройствам, удерживающим створки в закрытом состоянии. Срабатывание устройств и открывание створок должно происходить при избыточном давлении, значительно меньшем того, которое может вызвать разрушение стекол в переплетах. Двери и ворота, устраиваемые в наружном ограждении помещений, могут использоваться в качестве предохранительных конструкций, работающих по тому же принципу, что и открывающиеся створки неразрушающихся предохранительных конструкций.

Шарниры, которые обеспечивают поворот вращающихся предохранительных конструкций (рис. 4), в отличие от других крепежных устройств, рассчитываются на прочность. Они не должны разрушаться при вскрытии предохранительных конструкций. При прямолинейном поступательном движении образование расчётного отверстия в наружном ограждении, равного площади проема, происходит при удалении предохранительной конструкции от ограждающих конструкций (рис. 5).

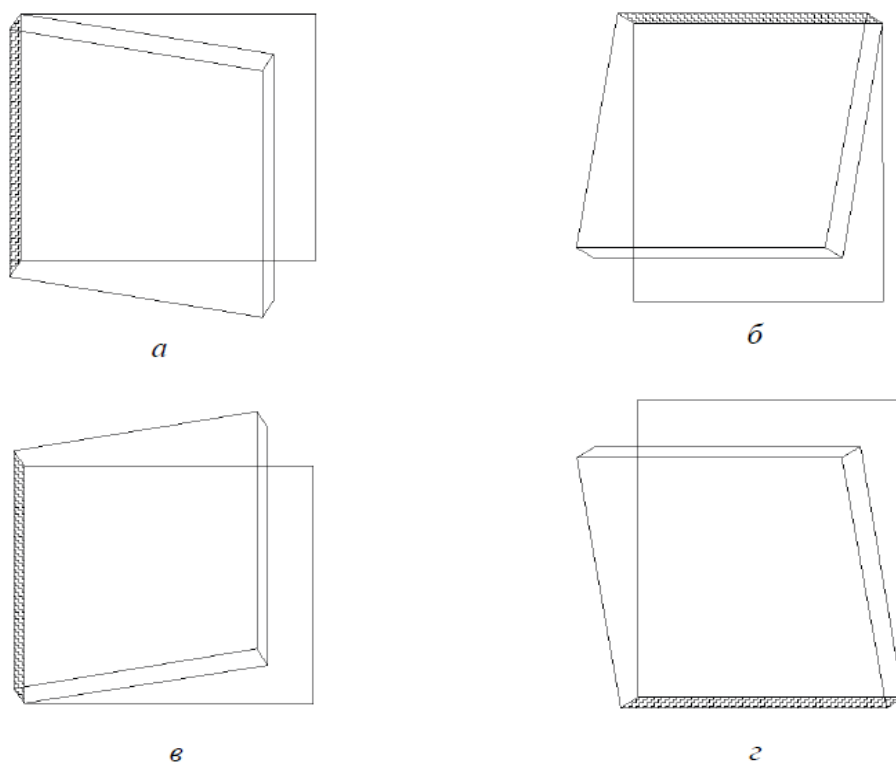


Рис. 4. Вращающиеся предохранительные конструкции:
а, б, в – при установке предохранительной конструкции в вертикальном ограждении с вертикальным, верхним горизонтальным и нижним горизонтальным шарниром;
г – при установке предохранительной конструкции в горизонтальном ограждении

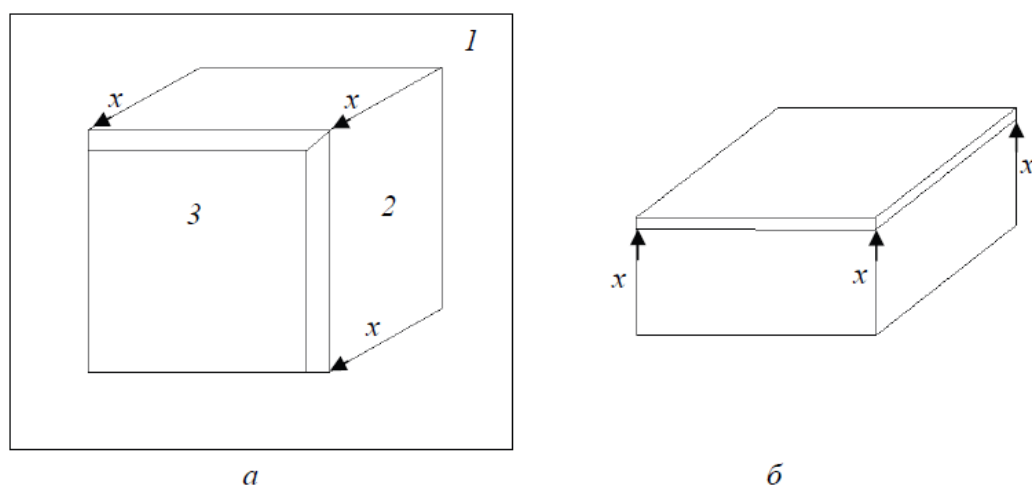


Рис. 5. Смещающиеся предохранительные конструкции:
а – при установке в вертикальном ограждении;
б – то же в горизонтальном ограждении; 1 – ограждение;
 2 – проём в ограждении; 3 – предохранительная конструкция;
x – смещение предохранительной конструкции

В закономерностях вскрытия предохранительные конструкции подразделяют на *инерционные* и *безинерционные*.

К *инерционным* относят такие предохранительные конструкции, масса которых оказывает влияние на закономерности их вскрытия и, потому, должна учитываться при расчётах. Если влияние массы на закономерности вскрытия предохранительных конструкций незначительно и им можно пренебречь, то такие предохранительные конструкции считаются *безинерционными*.

Инерционные предохранительные конструкции, как правило, вскрываются в результате разрушений крепёжных устройств.

Чем меньше избыточное давление $\Delta P_{\text{вск}}$, при котором происходит вскрытие предохранительных конструкций, тем эффективнее они будут работать при прочих равных условиях. Для предохранительных конструкций, устанавливаемых в наружном вертикальном ограждении (стенах) помещения, минимальное значение $\Delta P_{\text{вск}}$ определяется расчётом на ветровую нагрузку (при действии ветра не должны вскрываться). Крепёжные элементы, обеспечивающие вскрытие предохранительных конструкций, должны рассчитываться на разрушение (если вскрытие происходит в результате разрушения) или срабатывание при давлении от взрывного горения менее 5 кПа.

На закономерности вскрытия инерционных предохранительных конструкций может влиять их положение в ограждающих конструкциях, по отношению к поверхности земли. В связи с этим следует различать *вертикальные*, *наклонные* и *горизонтальные* предохранительные конструкции.

Для изготовления предохранительных конструкций применяется различные строительные материалы. В зависимости от конструктивного решения используют стекло, сэндвич-панели в виде слоев из облегченного металла с пенопластом и железобетон – для изготовления организованно разрушаемых конструкций. Предохранительные конструкции в виде остекления при воздействии нагрузки быстро разрушаются, при этом происходят большие потери тепла, что снижает эффективность их использования; в виде легкобрасываемых сэндвич-панелей хорошо сохраняют тепло, но при воздействии нагрузки могут травмировать людей, разрушить оборудование и стоящие рядом здания. Инерционные предохранительные конструкции в виде вращающихся плит сложны, так как каждая панель представляет собой механизм, что удорожает строительство.

Учитывая вышеизложенное, предлагается использовать в качестве защитных стен помещений *организованно разрушаемые конструкции* (рис. 6), вскрытие которых при взрывном горении происходит в результате разрушения плит в местах размещения специальных пазов. Толщина слоя бетона в пазу $\delta = 20 \text{ мм}$.

Организованно разрушаемые конструкции быстро разрушаются при действии нагрузок, не образуя обломков, и хорошо сохраняют тепло в отапливаемых зданиях. Организованно разрушаемые конструкции представляют собой железобетонные панели размером 6×1,8 м. Панель состоит из разрушаемой и неразрушаемой частей.

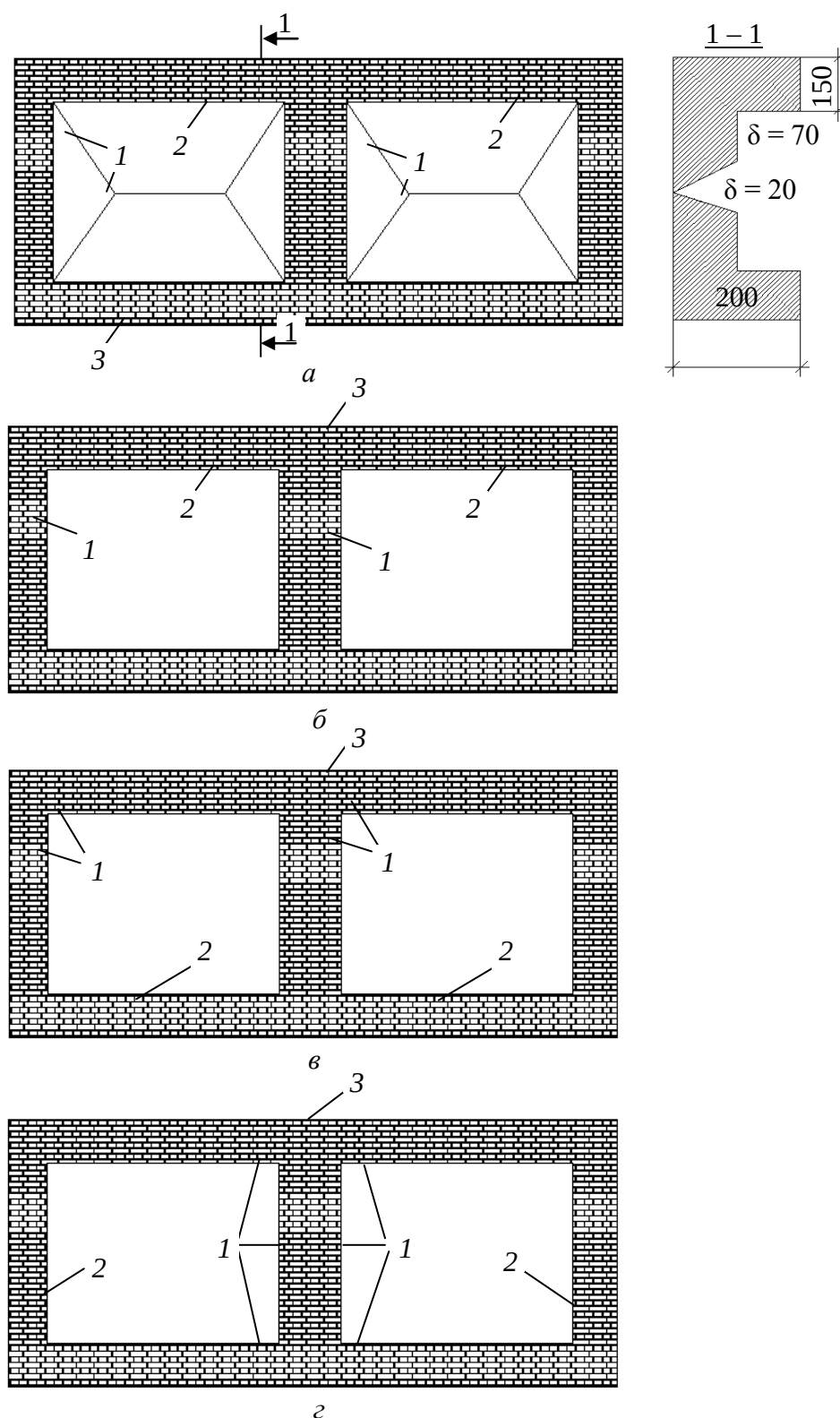


Рис. 6. Организованно разрушаемые конструкции:

а – с шарнирами по контуру (створки типа "ПАКЕТ");

б – с горизонтальным верхним шарниром; *в* – с горизонтальным нижним шарниром;

г – с вертикальным шарниром; 1 – места размещения пазов, обеспечивающих вскрытие плит;

2 – места вращения плит при разрушении; 3 – неразрушаемая часть плиты

Неразрушаемая часть конструкций выполнена в виде несущих ребер (200×150 мм) по контуру, разрушаемая часть – в виде двух прямоугольных плит размером 2,7×1,5 м и толщиной 5-70 мм, защемлённых в ребрах жёсткости. Плиты имеют ослабленные участки за счет прямолинейных, треугольных в поперечном сечении пазов. За счёт этих пазов плита при воздействии нагрузки может быть разделена на отдельные части.

Методика расчёта предохранительных конструкций

Расчёт включает определение потребной площади проемов и массы предохранительных конструкций [1, 5].

Этап 1. Определение площади проемов.

Площадь проемов для снижения давления в помещениях при взрыве горючей смеси до допустимых значений определяется с учётом имеющихся оконных и дверных проёмов:

$$F_{\text{пк}} = F - F_{\text{о}}, \text{ м}^2, \quad (1)$$

где $F_{\text{пк}}$ – площадь ПК, м^2 ;

$F_{\text{о}}$ – площадь дверных и оконных проёмов, м^2 ;

F – требуемая площадь проёмов для истечения продуктов взрыва

$$F = 4 \cdot V_{\text{о}}^{2/3} \cdot a \cdot U_{\text{н}} \cdot \sqrt{\rho_{\text{гп}}} \cdot (\varepsilon_{\text{р}} - 1) / \sqrt{\Delta P_{\text{доп}}}, \text{ м}^2, \quad (2)$$

где $V_{\text{о}}$ – свободный объём помещения, м^3 ;

a – коэффициент интенсивности горения (табл. 1);

$U_{\text{н}}$ – скорость горения продуктов сгорания горючей смеси, м/с (табл. 2);

$\rho_{\text{гп}}$ – плотность газов, истекающих из проемов помещения, кг/м^3 (табл. 2);

$\varepsilon_{\text{р}}$ – степень теплового расширения продуктов сгорания (табл. 2);

$\Delta P_{\text{доп}}$ – допускаемое давление в помещении (5 кПа).

Таблица 1

Значения коэффициента интенсивности горения

Степень зауженности сечения помещения, K	0	10 %	20 %	30 %
Коэффициент интенсивности горения, a	2	3,7	5	6

Таблица 2

Характеристика газоздушных смесей

Горючий компонент	Q , кДж/кг	$\rho_{\text{гп}}$, кг/м^3	$\varepsilon_{\text{р}}$, об. %	$U_{\text{н}}$, м/с	M , кг/кмоль	c , об. %
Аммиак	2370	0,66	7,35	0,10	15	19,72
Бутан	2776	2,55	7,84	0,38	58	3,13
Водород	3425	0,088	6,86	2,67	2	29,59
Метан	2763	0,071	6,71	0,34	16	9,45
Пропан	2801	2,02	7,71	0,46	44	4,03
Этан	2797	1,32	–	–	30	5,66
Этилен	3010	1,23	8,11	0,74	28	6,54

Примечание: Q – удельная энергия взрывчатого превращения

Для длинных помещений через некоторые отверстия будут истекать продукты сгорания с плотностью $\rho_{\text{CTX}}/\varepsilon_p$, а через другие – холодная смесь с плотностью ρ_{CTX} (стехиометрической концентрации). При этом расчётная эффективная плотность газов

$$\rho = \rho_{\text{CTX}} / \varepsilon_p + (\rho_{\text{CTX}} - \rho_{\text{CTX}} / \varepsilon_p) (\sqrt{H - B/L})^{1/2}, \text{ кг/м}^3. \quad (3)$$

Если сбросные отверстия сосредоточены в одном конце длинного помещения, то при воспламенении горючей смеси вблизи отверстий $\rho = \rho_{\text{CTX}}/\varepsilon_p$, а при воспламенении у глухого конца $\rho = \rho_{\text{CTX}}$. При большой длине помещения ($L/\sqrt{H \cdot B} \geq 10$) процесс из дефлаграционного горения может перерасти в детонационный.

Этап 2. Определение массы предохранительной конструкции.

Инерционные предохранительные конструкции представляют собой плиты $l \times b$ массой $m = 50-150 \text{ кг/м}^2$. Они перекрывают проемы на вертикальных (наружные стены) или горизонтальных ограждениях покрытия зданий. При этом имеют крепление, которое должно разрушаться, то есть предохранительные конструкции должны начать вскрываться при давлении $\Delta P_{\text{вск}} < \Delta P_{\text{доп}}$.

Обычно $\Delta P_{\text{вск}} = 1,5-2,5 \text{ кПа}$, $\Delta P_{\text{доп}} = 3-5 \text{ кПа}$. После разрушения крепления при $\Delta P_{\text{вск}}$ необходимо, чтобы текущее избыточное давление $\Delta P(t)$ не превышало $\Delta P_{\text{доп}}$ (рис. 1). Это достижимо, если к моменту образования сплошного проема прирост объёма горючего газа, за счет горения, не будет превосходить объёма газа, вытекающего из раскрывающихся отверстий. Следовательно, время образования сплошного проема $t_{\text{сп}}$ не должно превосходить время горения горючей смеси (t_0). До вскрытия предохранительной конструкции нагрузка, действующая на неё, равна избыточному давлению, возникающему в помещении при взрывном горении горючей смеси. Сразу же после разрушения крепежных устройств с началом движения предохранительных конструкций между ними и ограждением помещения образуются щели, через которые происходит интенсивное истечение газа из помещения в атмосферу.

На площадь предохранительной конструкции действует взрывная нагрузка и инерционные силы. Решая уравнение моментов этих сил, получим удельную массу предохранительной конструкции

$$m = 0,16 \cdot \Delta P_{\text{доп}} t_0^2, \text{ кг/м}^2, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{доп}}$ – допускаемое давление в помещении, Па;

t_0 – время окончания горения смеси, с;

$$t_o = \sqrt[3]{\mu V_o / (a \varepsilon_p U_n)}, \quad (5)$$

где V_o – свободный объём помещения, $V_o = V_n K_{св}$;
 V_n – объём помещения, $м^3$;
 $K_{св}$ – коэффициент свободного объёма помещения;
 μ – степень загазованности помещения:

$$\mu = 100 \cdot m^* / c \rho_{гп} V_o K_n, \quad (6)$$

где m^* – масса газа, поступающего в помещение при разгерметизации, $кг$;
 c – стехиометрическая концентрация горючей смеси, $об. \%$ (табл. 2);
 K_n – коэффициент негерметичности помещения, $K_n = 3$.

Реализация основных способов повышения взрывобезопасности зданий снизит или устраним вероятность возникновения аварийных взрывов и возможный ущерб от них.

Литература

1. Седнев В.А. Управление безопасностью экономики и территорий: учебник. М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. 322 с.
2. Седнев В.А. Требования к мероприятиям по повышению безопасности и устойчивости функционирования экономики в военное время // Технологии техносферной безопасности. Вып. 6 (70). 2016. С. 145-150. <http://academygps.ru/ttb>.
3. Седнев В.А. Обоснование и содержание мероприятий по повышению устойчивости функционирования экономики страны в военное время // Технологии техносферной безопасности. Вып. 3 (73). 2017. С. 154-162. <http://academygps.ru/ttb>.
4. Седнев В.А., Кошечая Е.И. Методика прогнозирования взрывоустойчивости жилых зданий при действии обычных средств поражения // Технологии техносферной безопасности. Вып. 1 (71). 2017. С. 137-147. <http://academygps.ru/ttb>.
5. Седнев В.А., Кошечая Е.И. Управление безопасностью экономики и территорий: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 162 с.

THE BASIS FOR THE TECHNOLOGY ASSESSMENT TO INCREASE THE EXPLOSION STABILITY OF BUILDINGS

In recent years the number of emergencies such as explosions of gas-air, steam-air and dust-air mixtures at fire and explosion dangerous and other objects has increased. This is the consequence of death, damage of process equipment, buildings and structures. On top of this the mode of detonation and explosive combustion is accepted for forecasting the situation in case of accidents with the explosion. It is characterized by the rate of process development.

Thus the main design and technological measures aimed at enhancing the blast resistance of facilities and buildings. Some of them are the devices for fire safety, aimed at the release of explosive mixture outside the premises, as well as equipment for the emergency ventilation and the restriction of evaporation area and reducing inflammable concentration of and combustible mixtures while their formation. On this basis, the article examines the design procedure for explosion relief valves, emergency ventilation, and restriction of the evaporation area. It allows substantiate measures for improving the sustainability of facilities, where gas-air, vapor-air and dust-air mixtures are used. The basic methods implemented for increasing the explosion safety of buildings will allow reduce or eliminate accidental explosion and possible damage.

Key words: dangerously explosive manufacture, explosion stability of buildings.

References

1. Sednev V.A. Upravlenie bezopasnostiu ekonomiki i territorii: uchebnik (Security management of the economy and territories: textbook). M.: Akademiia GPS MChS Rossii, 2017. 322 p. (in Russian).
2. Sednev V.A. Trebovaniia k meropriiatiiam po povysheniiu bezopasnosti i ustoichivosti funktsionirovaniia ekonomiki v voennoe vremia (Requirements for the measures to improve the security and stability of functioning of economy in war time) // Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti. Vyp. 6 (70). 2016. Pp. 145-150. <http://academygps.ru/ttb>. (in Russian).
3. Sednev V.A. Obosnovanie i sodержanie meropriiatii po povysheniiu ustoichivosti funktsionirovaniia ekonomiki strany v voennoe vremia (Rationale and content of the measures to improve the sustainability of the economy of the country in time of war) // Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti. Vyp. 3 (73). 2017. Pp. 154-162. <http://academygps.ru/ttb>. (in Russian).
4. Sednev V.A., Koshevaia E.I. Metodika prognozirovaniia vzryvoustoichivosti zhilykh zdaniy pri deistvii obychnykh sredstv porazheniia (Methods of predicting blast resistance design of residential buildings under the action of conventional means of destruction) // Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti. Vyp. 1 (71). 2017. Pp. 137-147. <http://academygps.ru/ttb>. (in Russian).
5. Sednev V.A., Koshevaia E.I. Upravlenie bezopasnostiu ekonomiki i territorii: ucheb. posobie (security Management of the economy and territories: textbook). M.: Akademiia GPS MChS Rossii, 2016. 162 p. (in Russian).