

В. А. ГОРЕВ, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

В. В. МОЛЬКОВ, д-р техн. наук, профессор, директор Инженерно-научного центра водородной безопасности, Ольстерский университет (Великобритания, Северная Ирландия, BT37 0QB, г. Ольстер, Ньютаунабби, блок 27; e-mail: v.molkov@ulster.ac.uk)

УДК 624.01:699.81

О ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕГО ВЗРЫВА ОТ УСТРОЙСТВА ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОЕМАХ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕН ПРОМЫШЛЕННЫХ И ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Рассматривается вопрос защиты от взрыва газовой смеси жилых зданий, в которых в качестве предохранительных конструкций (ПК) выступают окна остекления, заделываемые в глубине оконного проема. Показано, что при разрушении креплений, связывающих оконные рамы со стеной здания, ПК начинает движение внутри проема, площадь для истечения газов не открывается, и взрыв происходит в условиях герметичного объема. Установлено, что для помещений небольшого объема ($30\text{--}150\text{ м}^3$) время нарастания давления при внутреннем взрыве сравнимо с временем движения ПК внутри проема. Определена величина повышения давления во время движения ПК внутри проема. Выделен безразмерный параметр, который определяет рост давления с момента начала движения ПК до вскрытия проема для истечения газов. Показано, что превышение давления в 2–10 раз может привести к разрушениям до начала его сброса. Получено выражение для определения скорости ПК в момент вскрытия проема, и эта скорость в основном определяет темп сброса давления за счет истечения газов. Установлено, что рост давления за время движения ПК внутри проема превышает увеличение давления после начала вскрытия. Выявлено, что при испытании и проектировании ПК необходимо учитывать глубину заделки ПК в проеме, особенно для помещений жилых зданий, объем которых обычно не превышает 120 м^3 .

Ключевые слова: внутренний взрыв; сброс давления; давление вскрытия; скорость взрывного горения; глубина заделки; предохранительные конструкции.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25

Введение

Взрывы бытового газа в жилых зданиях стали настоящей национальной проблемой. Частые репортажи с места событий, сообщения о числе погибших и причинах случившегося вызывают тревогу, что обуславливает необходимость анализа причин и последствий взрывов газа в жилых помещениях. Для защиты от действия избыточного давления при внутреннем аварийном взрыве на промышленных объектах в обязательном порядке применяются предохранительные конструкции (ПК), если эти объекты отнесены к категории взрывоопасных [1]. При этом регламентируется площадь проемов, которые должны быть перекрыты [2, 3], а также требования к ПК, а именно к их площади в случае разрушающихся стекол и к массе единицы площади в случае ПК, располагаемых в покрытии.

Разрушение стекол зависит от формы и толщины листов остекления [3], а также от кратности остекления [4]. Для ПК, расположенных в покрытии, требуется, чтобы их масса на единицу площади не превышала 70 кг/м^2 . К ПК, расположенным в ограждающих конструкциях, такие требования не предъявляются, так как их оптимальность не подтверждается исследованиями. Очевидно, что эти требования должны зависеть от несущей способности защищаемого объекта и характеристик взрыва, в первую очередь от темпа нарастания давления при взрыве внутри объема.

Жилые здания и кухонные помещения не характеризуются как взрывоопасные, и специальные мероприятия по их защите от взрыва не предусматриваются. Однако частые взрывы бытового газа в жилых домах заставляют обратить внимание на эту проб-

лему, в частности поставить вопрос о применении ПК в кухонных помещениях.

В жилых зданиях в качестве естественных предохранительных конструкций выступают оконные переплеты, которые заделываются внутри проемов. Стеклоблоки в переплетах сохраняют целостность при повышении давления до значений, которые соответствуют вскрытию ПК. Поэтому ставка делается на отрыв переплета от ограждающих стен и его движение в проеме с последующим открытием пространства для истечения газов из объема. При движении предохранительных конструкций внутри проема объем, в котором происходит взрыв, остается замкнутым, поэтому давление в нем нарастает высокими темпами. За время движения ПК внутри проема давление в объеме может заметно увеличиться прежде, чем начнется его сброс после вылета ПК из проема.

Вскрытие инерционных ПК в приложении к защите зданий изучено недостаточно. Большинство работ посвящено защите взрывоопасного оборудования и сооружений, более устойчивых к взрывным нагрузкам [5–8].

Целью настоящей работы является изучение влияния глубины заделки ПК в проеме на характер протекания взрыва. Чтобы достичь поставленной цели, необходимо решить две задачи: определить изменение давления за время движения ПК в проеме и выяснить, как влияет повышение давления и разгон ПК при движении в проеме на сброс давления после открытия пространства для истечения газов. Для более плодотворного рассмотрения вопроса необходимо вспомнить основные моменты, имеющие место при внутреннем взрыве. В дальнейшем предполагается квазистатический характер взрыва [5, 9].

Методы исследования

Взрывное горение является дефлаграционным и начинается в герметичном объеме. Изменение давления при этом описывается выражением [10, 11]:

$$\frac{P_{(t)} - P_0}{P_{\max} - P_0} = \frac{m_{(t)}}{m_0}, \quad (1)$$

где $P_{(t)}$ — текущее давление в помещении, кПа;

P_0 — внешнее давление, чаще всего атмосферное, кПа;

$P_{\max}$ — максимальное давление взрыва в полностью герметичном объеме, кПа;

$m_{(t)}$ — масса смеси, сгоревшей к моменту времени t , кг;

m_0 — масса горючей смеси в начальный момент взрыва в полностью загазованном объеме, кг.

Параметр $P_{\max}$ зависит от свойств исходной горючей смеси в полностью загазованном объеме. Если принять, что расчетное допустимое давление $\Delta P_{\text{доп}}$

составляет примерно 7 кПа, $P_{\max} = 800$ кПа, то из (1) следует:

$$\frac{\Delta P_{\text{доп}}}{\Delta P_{\max}} = \frac{m_{(t)}}{m_0} = 10^{-2}.$$

Эта оценка показывает, что даже при загазованности 1 % давление взрыва уже достигнет расчетного допускаемого значения. Расчетные величины допускаемого давления определяются расчетом на несущую способность по первой группе предельных состояний [4, 12–16].

Из выражения (1) после дифференцирования следует:

$$\frac{d\Delta P_{(t)}}{dt} = \Delta P_{\max} \frac{4\pi U_{\text{г}}^3 \sigma^2 t^2}{V_0}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{(t)} = P_{(t)} - P_0$;

$U_{\text{г}}$ — скорость горения, постоянная величина до момента разгерметизации объема;

σ — степень расширения при горении, т. е. отношение плотности исходной смеси к плотности продуктов сгорания;

t — время до вскрытия ПК, с;

V_0 — свободный объем помещения, м³.

Выражение (2) получено в предположении, что доля сгоревшего вещества мала, поэтому плотность исходной смеси постоянна и равна начальной плотности ρ_0 ; очаг развития взрыва имеет сферическую форму. Из выражения (2) следует:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{(t)}}{P_0} &= \Delta P_{\max} \frac{4\pi \frac{(\sigma-1)\sigma^3}{3} U_{\text{г}}^3 t^3}{3V_0} = \\ &= \gamma \frac{\sigma-1}{\sigma} \frac{V_{(t)}}{V_0}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ для продуктов сгорания;

C_p, C_v — удельная изобарная и изохорная теплоемкость соответственно, Дж/(кг·К).

При $\gamma = 1,27$ и $\bar{P}_{\max} = P_{\max}/P_0 = 8$ степень расширения $\sigma = 6,5$. Из (3) видно, что давление на начальной стадии взрыва растет пропорционально $U_{\text{г}}^3 \sigma^3 t^3$ до достижения давления $\Delta P_{\text{от}}$, при котором проемы открываются для истечения газов в момент времени $t_{\text{от}}$ (рис. 1). Более подробно содержание и смысл рис. 1 раскрыты при обсуждении экспериментальных осциллограмм $\Delta P_{(t)}$ в работах [17–20].

Начиная с момента $t_{\text{в}}$ и до момента $t_{\text{от}}$ ПК движется внутри проема, не открывая пространства для истечения газов (рис. 2). Это значит, что объем в интервале времени $0 - t_{\text{от}}$ остается герметичным, хотя в промежуток времени от $t_{\text{в}}$ до $t_{\text{от}}$ ПК находится в движении. Увеличением свободного объема за время движения ПК пренебрегаем. После начала открытия пространства для истечения газов давление

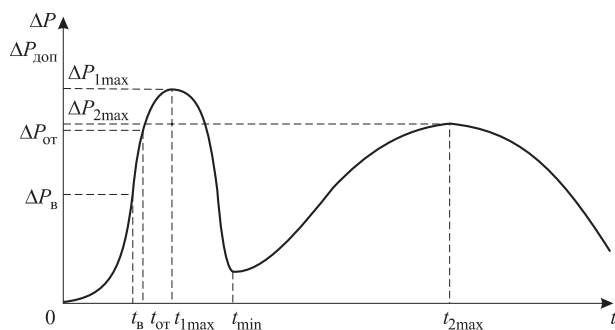


Рис. 1. Характер изменения давления при взрыве в объеме со вскрываемыми проемами: ΔP_v — давление вскрытия ПК, соответствующее моменту времени разрушения крепления ПК к каркасу здания

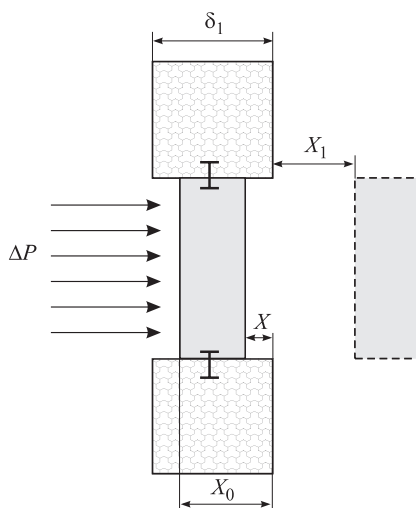


Рис. 2. Схема движения ПК внутри проема

в объеме растет до P_{1max} в течение времени $\Delta t_1 = t_{1max} - t_{от}$.

При этом площадь открытого пространства для истечения газов в момент t_{1max} составит:

$$S_{1max} = X_{1max} \Pi,$$

где Π — периметр проема, м.

Эта площадь обычно меньше, чем площадь полностью открытого проема S_o . По мере дальнейшего движения ПК площадь истечения возрастает быстрее, чем увеличивается площадь горения, и давление в объеме падает до ΔP_{min} . Примерно в момент t_{min} происходит изменение состава истекающей смеси. Вместо холодной исходной смеси начинают истекать горячие продукты горения со скоростью в $\sigma^{1/2}$ раз больше. В результате открытия проема и начала истечения горячих газов внутрь объема идет волна разрежения, что приводит, как правило, к развитию неустойчивости пламени и к его возможной турбулизации. При этом происходит повышение скорости горения. После полного открытия проема площадь истечения газов будет постоянной, а расширение очага горения будет продолжаться с одно-

временным ростом площади горения; давление в объеме будет расти до тех пор, пока фронт не подойдет к стенкам и углам помещения. В этот момент реализуется максимальная площадь горения и максимум давления ΔP_{2max} .

Результаты анализа и вычислений

Итак, после разрушения креплений ПК к стенкам они начинают перемещаться в проеме. Уравнение движения ПК имеет вид:

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} = ab \Delta P_{(t)}, \quad (4)$$

где $X = 0$, $dX/dt = 0$ при $t = 0$;

$$\Delta P(0) = \Delta P_{от};$$

M — масса предохранительной конструкции;

ab — площадь ПК;

$\Delta P_{(t)}$ — избыточное давление, действующее на ПК с момента t_v до момента $t_{от}$, когда ПК пройдет путь X_0 , и начнет открываться пространство для истечения газа.

Решение уравнения (4) на участке $0 - X_0$ или в интервале от t_v до $t_{от}$ имеет вид:

$$\bar{X} = \frac{B}{4} \left[\frac{(1 + \theta)^5}{5} - \theta - \frac{1}{5} \right], \quad (5)$$

$$\text{где } B = \frac{ab t_v^2 \Delta P_v}{m X_0}; \quad t_v = \frac{1}{U_{r1} \sigma} \left[\frac{3 \Delta P_v V_0 \sigma}{P_0 4 \pi \gamma (\sigma - 1)} \right]^{1/3};$$

$$\bar{X} = \frac{X}{X_0}; \quad \theta = \frac{t - t_v}{t_b}.$$

После достижения значения $\bar{X} = 1$ начинает открываться пространство для истечения газов. Безразмерное время достижения момента открытия $\theta_o = (t_{от} - t_v)/t_b$ определяется из условия $\bar{X} = 1$ из (5):

$$\frac{4}{B} = \left[\frac{(1 + \theta_o)^5}{5} - (1 + \theta_o) + \frac{4}{5} \right]. \quad (6)$$

Скорость движения ПК в момент начала открытия проема при $\bar{X} = 1$, $t = t_{от}$, $\theta = \theta_o$ определяется выражением

$$\left. \frac{d\bar{X}}{d\theta} \right|_{\substack{\bar{X}=1 \\ \theta=\theta_o}} = \frac{B}{4} [(1 + \theta_o)^4 - 1]. \quad (7)$$

В табл. 1 представлены результаты расчета времени вскрытия t_v и времени начала открытия $t_{от}$ в зависимости от объема помещения и ΔP_v или $\Delta P_{от}$. Расчеты приведены для $U_{r1} = 3,1$, $U_n = 3,1 \cdot 0,35 = 1,085$ м/с и $\sigma = 6,5$, $\gamma = 1,27$.

В табл. 1 разность между значениями времени для помещения одного объема (т. е. в одной графе) дает время движения ПК внутри проема с момента разрушения креплений ПК t_v до момента открытия проема $t_{от}$. Из анализа данных табл. 1 следует, что

Таблица 1. Результаты расчета времени вскрытия t_B и времени начала открытия $t_{от}$ в зависимости от объема помещения и давления

Давление, кПа	Время, с, при объеме помещения, м ³						
	30	40	50	60	100	120	150
$\Delta P_B = 2$	0,0725	0,080	0,086	0,091	0,108	0,1150	0,124
$\Delta P_{от} = 5$	0,0984	0,109	0,117	0,123	0,147	0,1560	0,167
$\Delta P_{от} = 7$	0,1100	0,121	0,130	0,138	0,164	0,1740	0,188
$\Delta P_{от} = 10$	0,1240	0,137	0,147	0,156	0,185	0,1970	0,210
$\Delta P_{от} = 15$	0,1420	0,156	0,168	0,178	0,210	0,2255	0,243

Примечание. Для ΔP_B указано время вскрытия, для $\Delta P_{от}$ — время открытия ПК.

при незначительной разнице времен t_B и $t_{от}$ давление в объеме изменяется в разы и может превысить допустимое давление до открытия проема. Таким образом, к ПК предъявляется жесткое требование, а именно: они должны пройти путь в проеме до его открытия за время $\theta_0 = (\Delta t_{от} - \Delta t_B) / \Delta t_B \ll 1$.

После начала открытия проема для истечения газов уравнение движения ПК представим в виде:

$$m \frac{d^2 X_1}{dt_1^2} = ab \frac{\Delta P_{от} + \Delta P_{1max}}{2}, \quad (8)$$

где X_1 — смещение ПК после начала открытия проема $t_{от}$;

t_1 — время движения ПК после начала открытия проема $t_{от}$.

Начало отсчета перемещения и отсчета времени начинается с 0, начальное значение скорости — $\left. \frac{dX_1}{dt_1} \right|_{t_1=0} = \left. \frac{dX}{dt} \right|_{t=t_{от}}$, т. е. в момент открытия проема

ПК имеет уже достаточную скорость, и дальнейшее открытие проема определяется ее величиной.

В уравнении (8) максимальное давление в объеме после открытия проема ΔP_{1max} не должно быть больше допустимого, т. е. $\Delta P_{1max} \leq \Delta P_{доп}$.

При решении (8) считалось, что на ПК действует среднее давление $(\Delta P_{от} + \Delta P_{1max})/2$. Учитывая, что при выходе из проема ПК стартует с начальной скоростью, определяемой из (7), можно предположить, что давление ΔP_{1max} несильно отличается от $\Delta P_{от}$.

Тогда решение (8) имеет вид:

$$X_1 = \frac{ab}{m} \frac{\Delta P_{от}}{2} t_1^2 + B_1 t_1; \quad (9)$$

или

$$B_1 = \frac{BX_0}{4t_B} [(1 + \theta_0)^4 - 1] \quad (10)$$

$$\bar{B}_1 = \frac{B}{4} [(1 + \theta_0)^4 - 1],$$

где $\bar{B}_1$ — безразмерная скорость предохранительных конструкций в момент их вылета из проема.

Время открытия проема определяется из (6) для разных значений B . Величина B меняется в широ-

ких пределах и определяет время от начала вскрытия до открытия проема. Чем меньше значение B , тем более длительное время движется предохранительная конструкция до открытия проема и тем выше давление в объеме в момент его открытия.

При определении силы, действующей на ПК со стороны взрыва, необходимо учитывать распределение давления по поверхности ПК. Давление уменьшается от центра ПК к периферии. Учет этого обстоятельства при стационарном обтекании круглой ПК приводит к уменьшению движущей силы в 2 раза. Это обстоятельство сказывается на движении ПК после вскрытия проема и мало влияет на характер изменения давления [5]. В рассмотренном случае движение ПК начинается внутри проема, и обтекание ее струей газов отсутствует. Основной подъем давления происходит также при движении ПК внутри проема. После открытия проема движение ПК определяется ее начальной скоростью, и ускорением при этом можно пренебречь.

В табл. 2 представлены зависимости времени $t_{от} = t_B(1 + \theta_0)$, отношения $\Delta P_{от}/\Delta P_B = (1 + \theta_0)^3$ и величины $\bar{B}_1$ от параметра B .

При анализе решений (9) и (10) принимается $\Delta P_{доп} \approx \Delta P_{1max}$, что справедливо для легких ПК. При этом получаем:

$$\bar{X}_1 = B\theta_1 \left[\frac{(1 + \theta_0)}{2} \theta_1 + (1 + \theta_0)^4 - 1 \right]; \quad (11)$$

$$\bar{X}_1 = \frac{X_1(t)}{X_0}; \quad \theta_1 = \frac{t_1}{t_B}.$$

При открывающемся проеме из объема начинают истекать газы, а давление в объеме описывается выражением

$$\frac{d\Delta P_1'}{d\theta_1} = \frac{3 \left(1 + \frac{\theta_1}{(1 + \theta_0)} \right)^2}{1 + \theta_0} - 0,266v_1 \frac{\pi \Delta P_B^{3/2} \theta_1}{\sigma^2 (\sigma - 1) U_r^3} \times$$

$$\times \frac{1 + \theta_0}{2} \theta_1 + (1 + \theta_0)^4 - 1 \sqrt{1 + \Delta P_1'},$$

$$\rho_0^{1/2} \rho_{II} (1 + \theta_0)^{3/2}$$

где $\Delta P_1' = (P_{(t)} - P_{от}) / \Delta P_{от}$;

Таблица 2. Зависимость времени $t_{от} = t_b(1 + \theta_0)$, отношения $\Delta P_{от}/\Delta P_b = (1 + \theta_0)^3$ и величины $\bar{B}_1$ от параметра B

Параметр	Значение параметра в зависимости от B								
	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	10	16	30	50
$t_{от} = t_b(1 + \theta_0)$	2,16	1,91	1,71	1,54	1,41	1,37	1,31	1,26	1,18
$\Delta P_{от}/\Delta P_b = (1 + \theta_0)^3$	10,08	7	5	3,65	2,8	2,6	2,25	2,0	1,66
$\bar{B}_1$	2,6	3,1	3,75	4,65	5,86	7,6	8,25	9,7	12

v_1 — коэффициент расхода; $v_1 \approx 0,8$;
 ρ_0 — плотность исходной смеси, кг/м³;
 ρ_n — масса единицы площади ПК, кг/м²;
 $\rho_n = M/(ab)$.

Как отмечалось ранее, после прохождения отрезка пути X_0 ПК приобретает скорость $\bar{B}_1 (X_0/t_b)$, которая составляет десятки метров в секунду, и дальнейшее вскрытие проема определяется ее величиной. При этом $\Delta \bar{P}'_1 \ll 1$ и $\theta_1 \ll 1$, поэтому в уравнении (12) можно пренебречь этими величинами по сравнению с единицей. Тогда уравнение (12) примет вид:

$$\frac{d\Delta \bar{P}'_1(\theta_1)}{d\theta_1} = A - F\theta_1; \quad (13)$$

$$A = \frac{3}{1 + \theta_0};$$

$$F = 0,266v_1 \frac{\Pi \Delta P_b^{3/2}}{\sigma^2 (\sigma - 1) U_r^3} \frac{(1 + \theta_0)^4 - 1}{\rho_0^{1/2} \rho_n (1 + \theta_0)^{3/2}}, \quad (14)$$

где $0,266 = 3 \cdot 2^{1/2} / (4\pi\gamma)$.

Периметр проема определяется после установления требуемой площади открытых проемов [4, 17, 18].

Решение уравнения (13) имеет вид:

$$\Delta \bar{P}'_1 = A\theta_1 - \frac{F\theta_1^2}{2}. \quad (15)$$

Из решения уравнения (15) видно, что давление после начала вскрытия проема растет, а при $\theta_{1\max} = A/F$ реализуется его максимум. При этом максимальный подъем давления $\Delta \bar{P}'_{1\max} = A^2/(2F)$.

Полное давление в объеме к моменту $\Delta t_{1\max} = t_b(1 + \theta_0) + t_b\theta_{1\max}$ (см. рис. 1) определяется как

$$\Delta P_{1\max} = \Delta P_b (1 + \theta_0)^3 \left(1 + \frac{A}{2F} \right). \quad (16)$$

К моменту достижения максимального давления $\Delta P_{1\max}$ проем открывается не полностью. Это значит, что расстояние, пройденное ПК после открытия проема за время $\Delta t_{1\max} = t_b\theta_{1\max}$, меньше расстояния X_2 , соответствующего полностью открытому проему ($X_2 = S_0/\Pi$).

В табл. 3 представлены результаты расчетов характерных величин для начальной стадии развития взрыва с учетом движения ПК в проеме и истечения газов.

При составлении табл. 3 использовались данные по периметру проема, через который сбрасывается давление. Форма и размер проема выбирались при проектировании по известной требуемой площади открытых проемов S_0 , которая определяется из условия сохранения несущей способности конструкций здания. Как уже отмечалось, допускаемое давление взрыва устанавливается расчетом элементов здания на несущую способность по первой группе предельных состояний. По определенному допускаемому давлению $\Delta P_{\text{доп}}$ рассчитывается необходимая площадь открытых к этому моменту проемов S_0 . Допускаемое давление не должно быть меньше давления $\Delta P_{2\max}$ (см. рис. 1), которое реализуется при максимальной площади пламени во время взрыва. Эта максимальная площадь определяется расчетом, например методом крупных частиц [21], или экспериментально на моделях малого масштаба [22–24]. Для оценок максимальной площади пламени при взрывах в помещениях прямоугольной формы использовалась зависимость $S_{2\max} = 4,5V_0^{2/3}$.

Полученная таким образом площадь на 10 % превышает площадь поверхности сферы, объем которой равен объему помещения V_0 .

Скорость горения U_{r2} , соответствующая моменту реализации второго максимума давления, определялась из предположения низкой начальной турбулентности в объеме $U'/U_n < 1$, когда скорость горения определяется неустойчивостью пламени [24–27]. Неустойчивость пламени всегда проявляется при смене состава истекающих газов [19, 20]. К моменту реализации максимальной площади горения всегда наблюдается истечение горячих продуктов горения. При построении табл. 3 принималось $U_{r2} = 5U_n = 5 \cdot 0,35 = 1,75$ м/с [25–33]. Сама площадь открытых проемов определялась из условия достижения второго пика давления $\Delta P_{2\max}$.

Условие реализации второго максимума — это равенство объемной скорости:

- истечения газов $\dot{V}_-$:

$$\dot{V}_- = S_0 v_2 \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{доп}} \sigma}{\rho_0}}; \quad (17)$$

Пара-метр	B = 1		B = 2		B = 4		B = 8		B = 16		B = 30		B → ∞												
	Объем помещения V ₀ , м ³																								
30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100								
Площадь проема S ₀ , м ² /Периметр проема П, м																									
1	1,5 5	2,1 5,9	3,34 7,5	1,5 5	3,34 7,5	2,1 5,9	1,5 5	3,34 7,5	2,1 5,9	1,5 5	3,34 7,5	2,1 5,9	1,5 5	3,34 7,5	3·0,7 14,1	2,1 5,9	3·1,13 19,1								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
ρ _н , кг/м ²	33,1	37,2	49,2	26,25	29,5	33,7	25	30	30; 10; 20	20	25	27	13,125	18,44	27	10	20	25	25	25	25	25	25	25	27
X ₀ , м	0,32	0,4	0,48	0,2	0,25	0,32	0,105	0,123	0,18; 0,54; 0,27	0,066	0,074	0,1	0,05	0,0345	0,048	0,072	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 + θ ₀	1,91	1,71	1,54	1,95	1,75	1,57	1,91	1,71	1,54	1,41	1,31	1,26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A	45,1	47,4	45,5	41,3	43,36	48,25	31	25,9	39,2; 116,7; 58,2	28,22	26,6	31,6	31,76	26,7	23,16	41,3	14,11	33,36	13,3	31,8	15,8	40,23	40,23	40,23	40,23
F(F ₁)	0,0348	0,033	0,0345	0,0423	0,04	0,0364	0,063	0,075	0,05; 0,0167; 0,0338	0,0755	0,08	0,067	0,072	0,086	0,099	0,046	0,46	0,29	0,475	0,307	0,436	0,273	0,273	0,273	0,273
θ _{1max}	0,0273	0,026	0,027	0,0372	0,0355	0,032	0,0613	0,073	0,0465; 0,0163; 0,032	0,08	0,085	0,072	0,0826	0,098	0,11	0,055	0,92	0,598	0,95	0,614	0,872	0,546	0,546	0,546	0,546
ΔP _{1max}	14,38	14,36	14,38	10,372	10,355	10,32	7,75	7,83	7,654; 7,42; 7,53	6,05	6,076	6,0	4,87	4,94	5	4,22	3,84	3,2	3,9	3,23	3,75	3,09	3,09	3,09	3,09
X ₂ , м	0,3	0,356	0,445	0,3	0,356	0,445	0,3	0,356	0,445	0,3	0,356	0,445	0,3	0,356	0,445	0,3	0,356	0,188	0,356	0,149	0,445	0,175	0,175	0,175	
X _{1max} , м	0,137	0,16	0,2	0,128	0,151	0,137	0,122	0,171	0,166; 0,163	0,118	0,14	0,159	0,106	0,128	0,147	0,107	0,08	0,0305	0,123	0,036	0,159	0,041	0,041	0,041	
K _φ	0,46	0,445	0,45	0,427	0,424	0,31	0,41	0,48	0,373; 0,374; 0,373	0,393	0,392	0,357	0,353	0,36	0,31	0,24	0,27	0,24	0,35	0,24	0,36	0,234	0,234	0,234	
ΔP _{отс} , кПа	14,0	10,0	7,3	5,6	4,5	2	4	2	2	4,5	2	4	2	2	2	4	2	2	2	2	2	2	2	2	

- производства газов при горении $\dot{V}_+$:

$$\dot{V}_+ = U_{r2}(\sigma - 1)K_\phi V^{2/3}, \quad (18)$$

где K_ϕ — коэффициент формы.

Коэффициент формы принят равным 4,5. В результате для объемов помещений $V_0 = 30; 50$ и 100 м^3 площади истечения S_0 составляют 1,5; 2,1 и $3,34 \text{ м}^2$, а периметры проемов Π — 5,0; 5,9 и 7,5 м. При определении S_0 принималось допустимое давление $\Delta P_{\text{доп}} = 9 \text{ кПа}$.

Скорость горения на первом максимуме до момента истечения горячих продуктов горения определялась из условия, что в этом случае горение происходит в герметичном объеме.

Скорость взрывного горения U_r зависит от многих параметров: в первую очередь от ламинарной скорости распространения пламени горючей смеси U_n ; во вторую — от уровня турбулентности в исходной смеси перед зоной горения. Уровень турбулентности в основном зависит от взаимодействия потока газов, вызванного расширением при горении, с преградами. При взрыве на нефтехимических и химических предприятиях преграды играют важную роль в ускорении горения. Там они находятся в свободном пространстве, и поток обтекает их. Другое дело — кухонные помещения. Здесь преграды расположены непосредственно у стен, и поток, двигаясь перпендикулярно к стенкам, не обтекает преграды полностью. Однако при приближении к стенкам и преградам пламя деформируется, и его форма отклоняется от сферической. Площадь его поверхности при этом увеличивается, но при соприкосновении со стенками и преградами уменьшается, и тогда реализуется второй пик давления $\Delta P_{2\text{max}}$. При слабой турбулентности в исходной смеси скорость горения определяется автотурбулизацией, которая в свою очередь обуславливается неустойчивостью пламени [25, 30–33].

Согласно [25] скорость горения при условии $U_n/U' > 1$ и неустойчивости пламени определяется выражением

$$U_r = U_n \psi(\sigma) \ln \frac{U_r L_{\text{max}}}{a\sigma}, \quad (19)$$

$$\text{где } \psi(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma + 1} \left(\sqrt{\sigma + 1 - \frac{1}{\sigma}} - 1 \right) = 1,48 \text{ при } \sigma = 6,5;$$

L_{max} — максимальное возмущение на фронте пламени;

a — коэффициент температуропроводности.

При аварийных взрывах, особенно на начальной стадии, взрывоопасная смесь неоднородна, и скорость горения в этот момент зависит от случайных условий утечки. Неустойчивость и автотурбулизация развиваются к моменту, когда определенное по

радиусу пламени число Пекле $Pe = U_n R/a > 10^5$ (где R — радиус очага пламени) [31]. При горении воздушных смесей, в том числе природного газа, радиус размера очага соответствует 4–5 м, при этом объем очага составляет 400 м^3 , что значительно превышает объем кухонных помещений. Следовательно, при горении в условиях кухонных помещений автотурбулизация до момента разгерметизации объема не наступает. В [31] предельная скорость горения, соответствующая началу автотурбулизации, оценивается как

$$U_r/U_n = 3,1. \quad (20)$$

Так оценивается скорость горения U_{r1} на первом пике давления. После того как начнут истекать горячие продукты горения, в объем распространяется волна разрежения, которая приводит к спонтанной неустойчивости пламени с конечной амплитудой возмущений. Это в свою очередь может вызывать более раннюю турбулизацию горения. В связи с этим скорость горения U_{r2} задается с большим значением.

Обсуждение результатов исследований

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что при $B = 1$ и $B = 2$ давление взрыва до открытия проема увеличивалось соответственно до 14 и 10 кПа, что выше допустимого значения $\Delta P_{\text{доп}} = 9 \text{ кПа}$. Это означает, что объект не соответствует требованиям по несущей способности. Снизить давление взрыва можно увеличением параметра B путем уменьшения произведения $\rho_n X_0$. Полезно рассмотреть возможность уменьшить давление взрыва к моменту открытия проема $\Delta P_{\text{от}}$, снижая давление вскрытия ΔP_v . Снижение давления вскрытия ΔP_v с 2 до 1 кПа уменьшает параметр B в $2^{5/3}$ раза. Так, если при $\Delta P_v = 2 \text{ кПа}$ $B = 2$, то при $\Delta P_v = 1 \text{ кПа}$ получим $B = 0,63$.

Несмотря на уменьшение параметра B за счет снижения давления вскрытия, конечное давление взрыва в герметичном объеме $\Delta P_{\text{от}}$ уменьшается за счет снижения ΔP_v . При $B = 0,63$ из выражения (6) следует, что $(1 + \theta_0) = 2,07$, так что $\Delta P_{\text{от}} = 8,87 \text{ кПа}$, что меньше $\Delta P_{\text{от}} = 10 \text{ кПа}$ при $B = 2$ и $\Delta P_v = 2 \text{ кПа}$.

Рост давления после начала истечения газов из объема незначительный и составляет обычно не более 10 %. Такое положение является прямым следствием разгона ПК на начальном участке движения на пути X_0 .

Увеличение параметра B приводит к снижению конечного давления взрыва только в случае уменьшения произведения $\rho_n X_0$. Уменьшение величины ρ_n ограничено: значение $\rho_n = 10 \text{ кг/м}^3$ при $B = 30$ уже близко к предельному. Уменьшение X_0 до 0 возможно и достигается креплением ПК к внешней стенке ограждения или профилированием, соответ-

ствующим расширением проема. При стремлении параметра B к бесконечности уравнение (13) принимает вид:

$$\frac{d\Delta\bar{P}'}{d\theta} = A(1 + \theta)^2 - F_1\theta^2(1 + \Delta\bar{P}')^{1/2}. \quad (21)$$

При $X \rightarrow 0$ величина θ_0 стремится к 0, поэтому

$$\Delta\bar{P}_{(0)} = \frac{\Delta P_{(0)} - \Delta P_B}{\Delta P_B}; \quad \theta = \frac{t - t_B}{t_B};$$

$$F_1 = \frac{0,133v\Gamma\Delta P_B^{3/2}}{\sigma^2(\sigma - 1)U_{г1}^3\rho_0^{1/2}\rho_{п}}.$$

Анализ уравнения (21) с предположением малости величин θ и $\Delta\bar{P}_{1\max}''$ возможен только при условии, что значение параметра F_1 превышает ~ 30 . При принятых для оценок значениях $\sigma = 6,5$, $U_{г1} = 1,035$ м/с, $\Delta P_B = 2000$ Па получаем $\Pi/\rho_{п} \approx 1$ м³/кг. Такая ситуация может быть реализована в случае малых значений $\rho_{п} \approx 10$ кг/м² и применения нескольких ПК меньшей площади, но при условии, что их суммарная площадь равна требуемой. В этом случае суммарный периметр возрастает в $K^{1/2}$ раз. Увеличения периметра можно достигнуть также за счет изменения формы проема в результате увеличения разности размеров его сторон.

Поскольку необходимая площадь открытых проемов $S_0 \sim V_0^{2/3}$, а $\Pi \sim V_0^{1/3}$, становится понятным, что для больших объемов условие $\Pi/\rho_{п} \sim 1$ м³/кг достигается легче. В табл. 3 в графах 20–25 при $B \rightarrow \infty$ представлены данные по вскрытию проемов, перекрытых ПК, не входящими в проем, а крепящимися к наружной стороне стены ($X_0 = 0$). В графах 20, 22 и 24 содержатся результаты, полученные для одного проема, а в графах 21, 23 и 25 — результаты, полученные для той же общей площади истечения, но реализованной в трех проемах. В результате скорость сброса давления через три открывающихся проема выше, чем через один проем. Время достижения максимального значения давления $\theta_{\max} = \sqrt{A/F_1}$, а само максимальное давление — $\Delta\bar{P}_{1\max} = 2/3 \cdot A\sqrt{A/F_1}$. Для очага взрыва сферической формы, которая в начальный момент взрыва вполне реальна, $A = 3$. Сравнение данных табл. 3 для случая $B \rightarrow \infty$ с другими случаями показывает, что конечное абсолютное давление на первом максимуме ($\Delta P_{1\max}$) всегда меньше для случая $B \rightarrow \infty$. Следует отметить, что приближение, принятое при получении результатов при $B \rightarrow \infty$, особенно для граф 20, 22 и 24, выполняется плохо и значение $\Delta P_{1\max}$ достаточно велико. Для выполнения приближения следовало уменьшить $\rho_{п}$ и $U_{г1}$. В работе случай $B \rightarrow \infty$ сравнивается со случаем $B = 8$. В действительности при $B \rightarrow \infty$ максимальное да-

вление взрыва не определяется этим параметром. Необходимо напомнить, что оценки $\Delta\bar{P}_{1\max}$ для $B \rightarrow \infty$ несколько завышены по сравнению с результатами численного решения (21). Поэтому выводы о том, что при $B \rightarrow \infty$, когда $X_0 = 0$, максимальное давление взрыва всегда меньше, чем для конечных значений B , остается в силе. Поскольку, как было показано, заделка ПК внутрь проема приводит к заметному, а иногда и к значительному росту давления взрыва во время процесса открывания проема, возникает необходимость провести анализ влияния различных параметров на рост давления. Наибольший темп роста давления при внутреннем взрыве наблюдается до открытия проемов, при этом максимальный подъем давления контролируется параметром B . Чем меньше параметр B , тем выше давление в объеме перед открытием проема. Регулировать величину B можно с помощью четырех параметров: массы единицы площади ПК $\rho_{п}$, глубины заделки ПК в проеме X_0 , давления вскрытия ΔP_B (разрушения связей ПК с ограждающими конструкциями), периметра проемов, через которые истекают газы. При уменьшении произведения $\rho_{п}X_0$ увеличивается параметр B и давление открытия проема снижается. При повышении давления вскрытия ΔP_B параметр B увеличивается и безразмерное давление открытия $\Delta\bar{P}_{от} = \Delta P_{от}/\Delta P_B$ также уменьшается, но абсолютное давление $\Delta P_{от} = \Delta P_B(1 + \theta_0)^3$ возрастает. Поэтому если снижается давление вскрытия ΔP_B , то давление взрыва уменьшается, несмотря на рост параметра B . Поскольку при открытии площади для истечения газов максимум давления $\Delta P_{1\max}$ достигается не при полном открытии проема ($X_{1\max} < X_0$), большое значение приобретает величина периметра проема. Увеличение периметра ведет к росту параметров F и F_1 и, как следствие, к более быстрому открытию площадей истечения и к уменьшению давления на первом максимуме $\Delta P_{1\max}$. Увеличить периметр проемов можно увеличением количества проемов, перекрываемых ПК, и разницы в длине сторон проема. Первый способ более эффективный. Следует отметить, что самое значительное влияние на давление на первом пике и на давление открытия оказывает произведение $U_{г1}^2\sigma^2(\sigma - 1)$, но регулировать эту величину заранее невозможно в силу случайности процесса загазованности и воспламенения. В работе для оценки этой величины приняты результаты работ [25, 30, 31], которые являются пессимистическими.

В настоящей работе рассмотрены наиболее типичные и возможные значения параметра B , при которых движение ПК можно разбить на два периода: движение внутри проема до его открытия и движение после вылета из проема после его открытия. При движении внутри проема ПК ускоряется и к мо-

менту выхода из проема обладает достаточной скоростью B_1 , так что смещение X_1 , обеспечивающее истечение газов, определяется этой скоростью: $X_1 \approx B_1 \Delta t_1$. При более высоких значениях параметра B , в том числе при $B \rightarrow \infty$ при $X_0 \rightarrow 0$, смещение ПК после открытия проема определяется ускорением ПК, а $X_1 \approx \frac{\Delta P_v + \Delta P_{\max}}{4\rho_{\Pi}} t_1^2$. Этим объясняется разность выражений для определения максимальных значений $\theta_{1\max}$ и $\Delta \bar{P}_{1\max}$.

Закключение

В заключение необходимо отметить, что до настоящей работы вопросу заделки ПК в проемах не уделялось должного внимания. Такое положение дел необходимо пересматривать и при проектировании способов крепления ПК учитывать глубину заделки ее внутри проема. Следует отметить, что поставленная цель — выяснить влияние глубины расположения ПК внутри проема на характер развития взрыва — достигнута. Выявлено влияние различных факторов, таких как давление вскрытия,

масса ПК, скорость горения, первоначальный объем взрывоопасного объекта, на изменение давления при движении ПК в проеме. Решена задача о величине и скорости изменения давления за время движения ПК внутри проема. Решена задача о влиянии глубины заделки ПК внутри проема на скорость сброса давления после начала истечения газов. Сброс давления происходит быстрее из-за начальной скорости ПК в момент начала истечения газов. При испытаниях проемов ПК на модельных установках также часто не учитывают возможность заглубления крепления, полагая, что масса ПК и свойства узлов крепления ПК полностью решают вопрос об эффективности ПК. Результаты, полученные в работе, однозначно показывают, что необходимо учитывать глубину заделки ПК. Испытания ПК на модельных установках проходят при высоких значениях параметра B , поскольку скорость взрывного горения в начальный момент взрыва при испытаниях соответствует ламинарной скорости распространения пламени. В связи с этим результаты испытаний часто дают излишне оптимистические результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. — Введ. 05.01.2009. — М.: ВНИИПО МЧС России, 2009. — 28 с.
2. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям. — Введ. 29.07.2013. — М.: ВНИИПО МЧС России, 2013. — 184 с.
3. СП 56.13330.2011. Производственные здания (с изм. № 1 от 18.08.2016). — Введ. 20.05.2011. — М.: Минрегион России, 2011. — 18 с.
4. Пилюгин Л. П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. — М.: Пожнаука, 2000. — 224 с.
5. Molkov V. V., Eber R. M., Grigorash A. V., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2003. — Vol. 16, No. 5. — P. 395–402. DOI: 10.1016/s0950-4230(03)00066-4.
6. Molkov V. V., Grigorash A. V., Eber R. M., Makarov D. V. Vented gaseous deflagrations: modelling of hinged inertial vent covers // Journal of Hazardous Materials. — 2004. — Vol. 116, Issue 1-2. — P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.027.
7. Molkov V. V., Grigorash A. V., Eber R. M., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations with inertial vent covers: State-of-the-art and progress // Process Safety Progress. — 2004. — Vol. 23, No. 1. — P. 29–36. DOI: 10.1002/prs.10002.
8. Molkov V. V., Grigorash A. V., Eber R. M. Vented gaseous deflagrations: Modelling of spring-loaded inertial vent covers // Fire Safety Journal. — 2005. — Vol. 40, Issue 4. — P. 307–319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.01.004.
9. Горев В. А., Сальмова Е. Ю. О возможности вибрационного горения при внутренних взрывах // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20.
10. Gorev V. A. Actions of explosive loads of the protecting designs taking into account vibration combustion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 365, Issue 4. — Art. No. 042047. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042047.
11. Иосет В. Взрывы и горение в газах / Пер. с нем. — М.: Изд-во иностр. лит., 1952. — 687 с.
12. Нестационарное распространение пламени / Под ред. Дж. Г. Маркштейна; пер. с англ. — М.: Мир, 1968. — 438 с.
13. Пилюгин Л. П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств (теоретические основы проектирования). — М.: Стройиздат, 1988. — 316 с.

14. Пилюгин Л. П. Прогнозирование последствий внутренних аварийных взрывов. — М. : Пожнаука, 2010. — 380 с.
15. Горев В. А., Плотников А. И. Устойчивость при внешних аварийных взрывах // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан : сб. тр. науч.-практ. конф. — М. : АСВ, 2005. — С. 32–45.
16. Лужин О. В., Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Расчет конструкций сооружений на действие взрывных волн // Динамический расчет сооружений на специальные воздействия / Коренев Б. Г., Рабинович И. М. (ред.). — М. : Стройиздат, 1981. — С. 5–28.
17. Салымова Е. Ю. Динамика развития опасных факторов в зданиях с ограждающими конструкциями из трехслойных сэндвич-панелей при пожарах и взрывах : дис. ... канд. техн. наук. — М. : МГСУ, 2014. — 110 с.
18. Горев В. А., Салымова Е. Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве эффективных легкосбрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2010. — Т. 19, № 2. — С. 41–44.
19. Горев В. А., Беляев В. В., Федотов В. Н. Условие начала вибрационного горения газа в разгерметизированном сосуде прямоугольной формы // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 36–39.
20. Горев В. А., Федотов В. Н. О роли акустических колебаний при взрывном горении газов в разгерметизированном сосуде // Структура газовых пламен : материалы Международного семинара по структуре газовых пламен (июль 1986 г., г. Новосибирск). — С. 202–208.
21. Поландов Ю. Х., Бабанков В. А. Влияние места расположения источника воспламенения в помещении на развитие взрыва газа // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 68–74.
22. Ellis O. C. Flame movement in gaseous explosive mixtures // Part 7. Fuel in Science and Practice. — 1928. — Vol. 7. — P. 502–509.
23. Попов В. А. Начальный участок распространения пламени в закрытых трубах // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. — 1956. — № 3. — С. 116–125.
24. Ellis O. C. Flame movement in gaseous explosive mixtures // Part 2. Fuel in Science and Practice. — 1928. — Vol. 7. — P. 245–251.
25. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение. — М. : Наука, 1986. — 288 с.
26. Горев В. А. Оценка скорости горения однородной газовой смеси при определяющем влиянии неустойчивости пламени // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2008. — Т. 17, № 1. — С. 12–16.
27. Газодинамика горения / К. И. Щелкин, Я. К. Трошин; Акад. наук СССР; Ин-т хим. физики. — М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1963. — 255 с.
28. Bradley D. How fast can we burn? // Symposium (International) on Combustion. — 1992. — Vol. 24, Issue 1. — P. 247–262. DOI: 10.1016/s0082-0784(06)80034-2.
29. Abdel-Gayed R. G., Bradley D. Dependence of turbulent burning velocity on turbulent Reynolds number and ratio of laminar burning velocity to R. M. S. turbulent velocity // Symposium (International) on Combustion. — 1977. — Vol. 16, Issue 1. — P. 1725–1735. DOI: 10.1016/s0082-0784(77)80450-5.
30. Kakutkina N. A., Korzhavin A. A., Zamashchikov V. V., Pleslov A. A., Babkin V. S. Scale modelling of internal gas explosions // Proceedings of 1st International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations / Molkov V. V. (ed.). — Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1995. — P. 225–230.
31. Bradley D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions // Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations / Molkov V. V. (ed.). — Moscow : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997. — P. 51–59.
32. Pocheau A. Front propagation in a turbulent medium // Europhysics Letters (EPL). — 1992. — Vol. 20, Issue 5. — P. 401–406. DOI: 10.1209/0295-5075/20/5/004.
33. Peters N. The turbulent burning velocity for large-scale and small-scale turbulence // Journal of Fluid Mechanics. — 1999. — Vol. 384. — P. 107–132. DOI: 10.1017/s0022112098004212.

Материал поступил в редакцию 16 сентября 2018 г.

Для цитирования: Горев В. А., Мольков В. В. О зависимости параметров внутреннего взрыва от устройства предохранительных конструкций в проемах ограждающих стен промышленных и жилых зданий // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 10. — С. 6–25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25.