

Г. Г. ОРЛОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

А. Я. КОРОЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

УДК 614.841.123.24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ИНЕРЦИОННЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Показано, что при решении практических задач взрывозащиты промышленных зданий и сооружений необходимо в одинаковой степени уметь правильно подобрать площадь и параметры предохранительных конструкций для обеспечения снижения возникающих нагрузок до безопасных величин и рассчитать несущие конструкции на динамическую устойчивость при сохранении их несущей способности, а для этого необходимо определить нагрузки, возникающие при взрыве горючих смесей внутри помещений. Приведены допущения, на которых основывается математическая модель, описывающая динамику сгорания горючих смесей в объеме с учетом их истечения. Приведены расчетные схемы для определения нагрузок на конструкции при взрыве горючих смесей в разных объемах с различными видами ЛСК. Приведены системы уравнений для определения величины и характера нагрузок на ограждающие конструкции при использовании различных видов инерционных ЛСК. Составлена программа на ЭВМ для решения данных систем.

Ключевые слова: взрывные нагрузки; предохранительные конструкции; горючие газо-, паро- и пылевоздушные смеси; устойчивость несущих конструкций; взрывозащита.

Одной из основных задач в общей проблеме взрывобезопасности является умение определять нагрузки на ограждающие конструкции, возникающие при взрыве горючих газо-, паро- и пылевоздушных смесей внутри помещения. Существующая теория горения, взрыва и детонации горючих смесей отвечает на вопросы, связанные с явлениями взрывного горения при течении таких процессов в трубах [1, 2]. В то же время взрывы горючих смесей в больших объемах, соизмеримых с объемами промышленных зданий, изучены недостаточно. В связи с этим при решении практических задач защиты зданий взрывоопасных производств от разрушений при построении модели для определения величины и характера взрывных нагрузок, действующих на строительные конструкции, заведомо следует принимать такие исходные данные, которые позволят получать надежные результаты по обеспечению взрывозащиты [3, 4].

Основная идея защиты промышленных зданий при взрыве горючих смесей внутри помещения заключается в обеспечении прочности и устойчивости

несущих конструкций, а также разрушения или вскрытия специальных предохранительных конструкций (ПК) при минимальных нагрузках (импульс, давление). Таким образом, при решении практических задач взрывозащиты промышленных зданий и сооружений необходимо в одинаковой степени уметь правильно подобрать площадь и параметры ПК для обеспечения снижения возникающих нагрузок до безопасных величин и рассчитать несущие конструкции на динамическую устойчивость при сохранении их несущей способности. Для этого необходимо определить нагрузки, возникающие при взрыве горючих смесей внутри помещений.

Задача по определению величины и характера нагрузок, действующих на ограждающие конструкции при взрывном горении газовоздушных смесей (ГВС) внутри объемов с отверстием, решалась в работах [5–7].

Математическая модель, описывающая динамику сгорания ГВС в объеме с учетом их истечения, основывается на следующих допущениях.

1. После воспламенения взрывоопасной смеси пламя распространяется в виде сферы; все точки поверхности фронта пламени в любой момент времени находятся на одинаковом расстоянии от источника зажигания, т. е. не учитывается влияние потока газа, истекающего из отверстия или нескольких отверстий, на форму пламени, взаимодействие пламени со стенками замкнутого объема, а также на форму распространения фронта пламени.

Фронт пламени приобретает сферическую форму при самопроизвольном распространении в неограниченной невозмущенной среде. Такой вид фронта пламени наблюдается только в начальный момент его распространения при зажигании горючей смеси в замкнутых объемах любой формы. В сферических сосудах фронт распространения пламени при зажигании в центре сохраняет сферическую форму до конца процесса. Подобная картина наблюдается и в объемах, в которых отношение длины к наименьшему размеру их поперечного сечения (ширины или высоты) близко к единице. Предположение о сферической симметрии фронта пламени является обычным для помещений, размеры которых не сильно отличаются друг от друга [8]. Это приближение ограничено начальными стадиями горения, и его точность тем выше, чем меньше избыточное давление.

Помещения, в которых размещаются взрывоопасные производства, имеют форму, близкую к прямоугольной с различным отношением длин сторон. Из проведенных экспериментов видно, что сферическая форма фронта пламени может быть ограничена объемами прямоугольной формы, если меньшая из сторон равна наибольшему геометрическому размеру помещения или составляет не более 1/3 от него. Тогда с достаточной точностью можно принять, что площадь фронта пламени $S_f = 5V_n$ (где V_n — объем помещения).

2. До момента вскрытия отверстия в наружном ограждении повышение давления внутри помещения происходит так же, как и в замкнутом объеме. С момента вскрытия отверстия, наряду с процессом горения ГВС, внутри объема при определении давления учитывается истечение газа через образовавшиеся проемы. Характер процесса истечения газа принимается адиабатическим.

3. Поскольку рассматривается процесс взрывного горения, при котором скорость распространения пламени меньше скорости звука в горючей среде, принимается, что процесс изменения давления на ограждающие конструкции будет квазистатическим, а давление — одинаковым во всех точках помещения. Предположение о независимости давления в помещении от пространственных координат является общепринятым и справедливым при усло-

вии $u_n \varepsilon / c_0 \ll 1$ (т. е. скорость пламени меньше скорости звука), а также при $\alpha / c_0 \ll \beta / (u_n \varepsilon)$ (где u_n — скорость распространения пламени; ε — степень расширения смеси при сгорании; c_0 — объемная концентрация вещества в смеси; α, β — больший и меньший размеры помещения) [7, 8].

4. На основании этих предпосылок, а также экспериментальных результатов [3, 7] рассматривается задача сгорания газа как в сферическом объеме, так и в объеме, отличном от сферического, с наличием вскрываемого отверстия. При этом предполагается, что может иметь место, во-первых, истечение через отверстие в среду с постоянным давлением P_0 сначала только горючей смеси, а затем продуктов сгорания и, во-вторых, процесс горения с учетом одновременного истечения продуктов сгорания и горючей смеси.

5. В работах [5, 10, 11] показано, что выражения, определяющие динамику сгорания газа в замкнутом объеме, могут быть рассмотрены по входящим в них термодинамическим параметрам, в частности по коэффициенту расширения продуктов сгорания ε , а также по основным предположениям относительно теплоемкостей свежего газа γ_u и продуктов сгорания γ_v . Важнейшими параметрами, определяющими динамику сгорания, являются коэффициент расширения и скорость пламени. Отношение теплоемкостей газа и продуктов сгорания γ_u / γ_v оказывает относительно слабое влияние на время сгорания, но существенно влияет на скорость нарастания давления. Поэтому для начальной стадии горения при получении математической модели, описывающей динамику сгорания газа в постоянном объеме с отверстием, без существенной потери точности можно допустить равенство $\gamma_u = \gamma_v$, что позволит упростить зависимости, описывающие динамику сгорания ГВС.

6. Изменение давления в объеме при сгорании газа является функцией доли сгоревшей смеси и скорости выгорания, равной произведению нормальной скорости распространения пламени по горючей среде на площадь ее поверхности. На первом этапе решения поставленной задачи вводится допущение, что фронт пламени после его деформирования сохраняет сферическую форму, а фактор турбулизации остается постоянным в течение взрыва после начала деформирования фронта пламени.

7. Увеличение скорости распространения пламени внутри помещения или в момент разгерметизации проема учитывается с помощью введения коэффициента интенсификации горения α [12, 13]. Опыты по исследованию интенсификации процесса взрывного горения ГВС показали, что на изменение скорости перемещения фронта пламени, помимо присущего ему явления неустойчивости, будут влиять: наличие преград на пути его распростране-

ния и расстояние между ними, степень заполнения объема помещения различными объектами, принудительный воздухообмен, вид горючей смеси [9, 11].

Допустим, что отверстие в наружном ограждении в помещении со взрывоопасным производством закрыто горизонтально лежащей плитой массой m . В тот момент, когда давление в помещении достигнет величины, определяемой выражением $P_u = mg/S + P_0$ (где g — ускорение свободного движения, м/с²; S — площадь поверхности плиты, м²; P_0 — начальное давление, Па). Уравнение движения имеет вид:

$$mx = [P(t) - P_0]S - mg, \quad (1)$$

где x — высота поднятия плиты, м;

$\bar{P}(t)$ — усредненное давление на плиту;

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{S} \iint P(x, y, z) dx dy; \quad (2)$$

P — давление в определенной площади поверхности, Па.

Уравнение Бернулли для газа, вытекающего из отверстия, имеет вид:

$$-dL = dE_k + dP/\rho, \quad (3)$$

где L — линейный размер помещения;

E_k — кинетическая энергия расширяющегося газа;

ρ — плотность газа.

Работа, производимая 1 кг газа при адиабатическом расширении, определяется по уравнению

$$-L = E_k + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right], \quad (4)$$

где γ — объемная теплоемкость, Дж/(м³·К).

Тогда уравнение движения плиты примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(mgx + \frac{mx^2}{2} \right) + E_k G = \\ = - \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] G, \end{aligned} \quad (5)$$

где G — секундный расход газа.

Оценим, какая часть энергии газа идет на движение плиты:

$$\frac{d}{dt} \left(mgx + \frac{mx^2}{2} \right) = mg\dot{x} + m\ddot{x}x = [\bar{P}(t) - P_0] \dot{x} S, \quad (6)$$

где $\dot{x}$, $\ddot{x}$ — производная и вторая производная от высоты поднятия плиты.

Так как P отличается от P_0 на несколько процентов, то

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] = \\ = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \left[1 - \left(1 - \frac{P - P_0}{P} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] = \\ = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P - P_0}{P} = \frac{P - P_0}{\rho}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда отношение той части энергии, которая идет на движение плиты $E_{пл}$, к полной энергии расширяющегося газа можно записать в виде

$$\frac{E_{пл}}{E_k} = \frac{[\bar{P}(t) - P_0] \dot{x} S_{отв} \rho}{(P - P_0) G} \leq \frac{\dot{x}}{\omega}, \quad (8)$$

где ω — средняя скорость истекающего газа, м/с.

Как показывают экспериментальные данные, скорость движения легкосбрасываемой конструкции (ЛСК) значительно меньше скорости истечения газов. Следовательно, на движение ЛСК идет лишь небольшая часть кинетической энергии, поэтому для расчета потока газа из отверстия, закрытого инерционной ЛСК, можно воспользоваться формулами (5)–(7). Только в этом случае площадь отверстия в наружном ограждении помещения будет зависеть от типа, места расположения, размеров и массы ЛСК.

Для того чтобы установить величину и характер изменения давления, возникающего при взрывах в помещениях, закрытых инерционными ЛСК, необходимо решать уравнения (5)–(7) совместно с уравнениями движения ЛСК. Для различных типов инерционных ЛСК эти уравнения будут иметь соответствующий вид:

1) для смещаемых ЛСК:

– представляющих собой свободно опертые плиты, располагаемые в горизонтальном наружном ограждении помещения (рис. 1,а):

$$m(d^2x/dt^2) = [P(t) - P_0]ab - mg; \quad (9)$$

– расположенных в вертикальном ограждении помещения (рис. 1,б):

$$m(d^2x/dt^2) = [P(t) - P_0]ab; \quad (10)$$

2) для поворотных ЛСК:

– с горизонтальным верхним шарниром (рис. 2,а):

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -mg \frac{l}{2} \sin \varphi + [P(t) - P_0] \frac{l^2 b}{2}; \quad (11)$$

– с горизонтальным нижним шарниром (рис. 2,б):

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = mg \frac{l}{2} \sin \varphi + [P(t) - P_0] \frac{l^2 b}{2}; \quad (12)$$

– с боковым вертикальным шарниром (рис. 2,в):

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} = [P(t) - P_0] \frac{l^2 b}{2}, \quad (13)$$

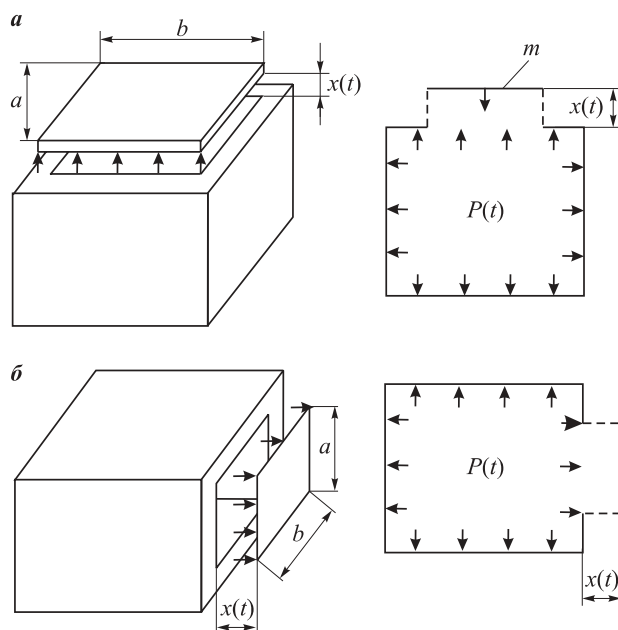


Рис. 1. Расчетные схемы для определения нагрузок на конструкции при взрыве горючей смеси в объеме, в ограждении которого находятся смещаемые ЛСК: *a* — в горизонтальном ограждении (покрытии); *b* — в вертикальном (стенном) ограждении

где J — момент инерции массы плиты относительно оси вращения;

φ — угол раскрытия поворотных ЛСК;

l — высота поворотного элемента, м.

Чтобы решить уравнения (9)–(13), необходимо знать давление на вскрываемые элементы $\bar{P}(t)$, создаваемое истекающими газами на ЛСК. Это давление в момент вскрытия равно давлению на ограждающие конструкции помещения и падает при дальнейшем вскрытии ЛСК.

В уравнениях (9)–(13) единственным параметром, который зависит от положения ЛСК, является x . При выполнении расчетов могут быть сделаны следующие допущения. Коэффициент истечения принимается постоянным. Площадь отверстия может быть задана следующим образом:

- для смещаемых ЛСК:

$$S_{\text{отв}} = 2(a + b)x, \text{ если } 2(a + b)x < ab;$$

$$S_{\text{отв}} = ab, \text{ если } 2(a + b)x > ab;$$

- для поворотных ЛСК:

$$S_{\text{отв}} = l^2 \sin \varphi + 2bl \sin \frac{\varphi}{2},$$

$$\text{если } l^2 \sin \varphi + 2bl \sin \frac{\varphi}{2} < bl;$$

$$S_{\text{отв}} = bl, \text{ если } l^2 \sin \varphi + 2bl \sin \frac{\varphi}{2} > bl,$$

где a, b — длина и ширина ЛСК, м.

Выполненные эксперименты по оценке влияния инерционных ЛСК на характер и величину изме-

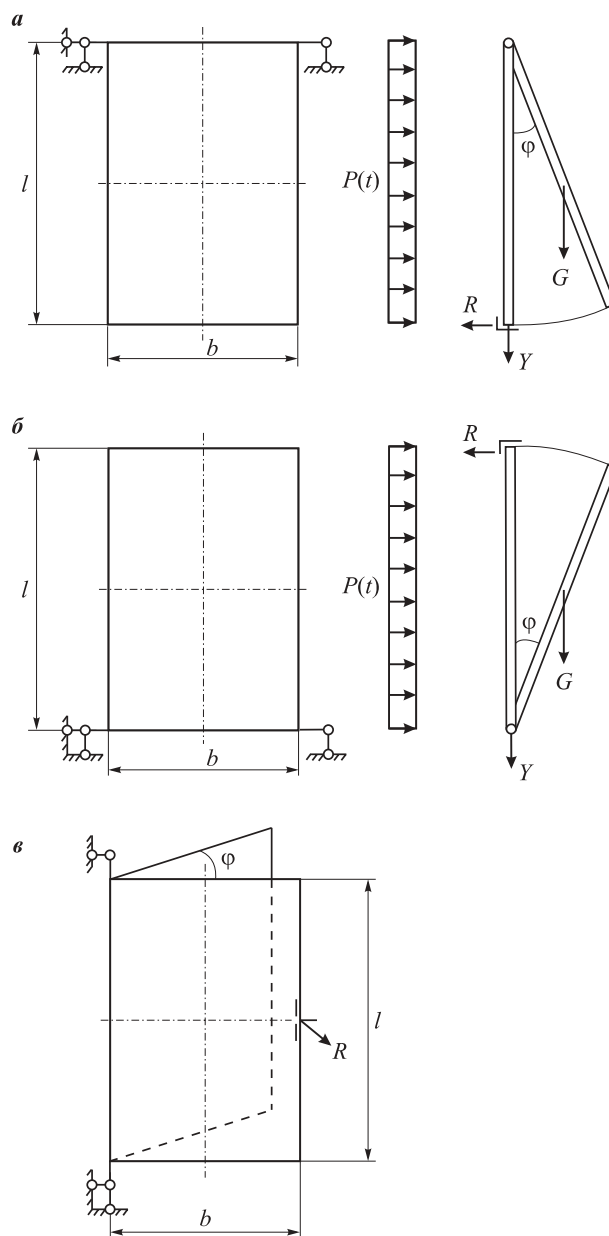


Рис. 2. Расчетные схемы для определения нагрузок при взрыве горючей смеси в объеме, в ограждении которого находятся поворотные ЛСК: *a* — с горизонтальным верхним шарниром; *b* — с горизонтальным нижним шарниром; *в* — с вертикальным шарниром

нения давления на примере смещаемых ЛСК в горизонтальном и вертикальном ограждениях и поворотных ЛСК в вертикальном ограждении опытных объемов (1; 10 и 14 м³) показали, что закон движения ЛСК важно знать только на начальном участке их движения. Так, смещаемые ЛСК оказывают влияние на изменение давления на ограждающие конструкции до момента, пока площадь вскрываемой ЛСК не достигнет площади отверстия в ограждении, т. е. $S_{\text{отв}} \geq ab$, когда $2(a + b) \geq ab$, а площадь поворотной ЛСК — $S_{\text{отв}} \geq bl$, когда $l^2 \sin \varphi + 2bl \sin (\varphi/2) \geq bl$. В дальнейшем движение ЛСК не оказывает заметного влияния на изменение давления в объеме.

При решении практических задач по определению величины и характера давления, возникающего при взрывном горении ГВС внутри помещений, отверстия которых закрыты инерционными ЛСК (например, для дозвукового режима истечения газа из объема без учета одновременного истечения горючей смеси и продуктов сгорания), уравнения (8), (9) и (13) следует решать совместно с одним из уравнений, характеризующих закон движения ЛСК (9)–(13).

Системы уравнений для определения величины и характера нагрузок на ограждающие конструкции при использовании различных видов инерционных ЛСК можно представить в следующем виде:

- для смещаемых ЛСК, располагаемых в покрытии, при $t = 0, P = P_0, x = 0, R = 0; t = t_{\text{вск}}, P = P_{\text{вск}}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= P_0 \frac{\left(\frac{\rho_u}{\rho_v} - 1\right) \alpha U_n S_f - \frac{1}{\rho_u} \frac{dm_v}{dt}}{\frac{V_v}{\gamma_v} + \frac{V_u}{\gamma_u}}; \\ \frac{dR}{dt} &= \alpha U_n \frac{\rho_u}{\rho_v} - \frac{1}{S_f} \frac{V_v}{\gamma_v} \frac{1}{P_0} \frac{dP}{dt}; \\ \frac{d\xi}{dt} &= (\bar{P} - P_0) S_{\text{отв}}^{\text{эл}} / m - g; \\ \frac{dx}{dt} &= \xi; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

- для смещаемых ЛСК, располагаемых в вертикальном ограждении помещения, при $t = 0, P = P_0, x = 0, R = 0; t = t_{\text{вск}}, P = P_{\text{вск}}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= P_0 \frac{\left(\frac{\rho_u}{\rho_v} - 1\right) \alpha U_n S_f - \frac{1}{\rho_u} \frac{dm_v}{dt}}{\frac{V_v}{\gamma_v} + \frac{V_u}{\gamma_u}}; \\ \frac{dR}{dt} &= \alpha U_n \frac{\rho_u}{\rho_v} - \frac{1}{S_f} \frac{V_v}{\gamma_v} \frac{1}{P_0} \frac{dP}{dt}; \\ \frac{d\xi}{dt} &= (\bar{P} - P_0) S_{\text{отв}}^{\text{эл}} / m; \\ \frac{dx}{dt} &= \xi; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

- для поворотных ЛСК с горизонтальным верхним шарниром в вертикальном стеновом ограждении при $t = 0, P = P_0, Y = 0, R = 0; t = t_{\text{вск}}, P = P_{\text{вск}}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= P_0 \frac{\left(\frac{\rho_u}{\rho_v} - 1\right) \alpha U_n S_f - \frac{1}{\rho_u} \frac{dm_v}{dt}}{\frac{V_v}{\gamma_v} + \frac{V_u}{\gamma_u}}; \\ \frac{dR}{dt} &= \alpha U_n \frac{\rho_u}{\rho_v} - \frac{1}{S_f} \frac{V_v}{\gamma_v} \frac{1}{P_0} \frac{dP}{dt}; \\ \frac{d\xi}{dt} &= -\frac{mg}{I} \frac{l}{2} \sin \varphi + (\bar{P} - P_0) \frac{l^2 b}{2I}; \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \xi; \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

- для поворотных ЛСК с горизонтальным нижним шарниром при $t = 0, P = P_0, Y = 0, R = 0; t = t_{\text{вск}}, P = P_{\text{вск}}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= P_0 \frac{\left(\frac{\rho_u}{\rho_v} - 1\right) \alpha U_n S_f - \frac{1}{\rho_u} \frac{dm_v}{dt}}{\frac{V_v}{\gamma_v} + \frac{V_u}{\gamma_u}}; \\ \frac{dR}{dt} &= \alpha U_n \frac{\rho_u}{\rho_v} - \frac{1}{S_f} \frac{V_v}{\gamma_v} \frac{1}{P_0} \frac{dP}{dt}; \\ \frac{d\xi}{dt} &= \frac{mg}{I} \frac{l}{2} \sin \varphi + (\bar{P} - P_0) \frac{l^2 b}{2I}; \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \xi; \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

- для поворотных ЛСК с боковым вертикальным шарниром при $t = 0, P = P_0, Y = 0, R = 0; t = t_{\text{вск}}, P = P_{\text{вск}}$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= P_0 \frac{\left(\frac{\rho_u}{\rho_v} - 1\right) \alpha U_n S_f - \frac{1}{\rho_u} \frac{dm_v}{dt}}{\frac{V_v}{\gamma_v} + \frac{V_u}{\gamma_u}}; \\ \frac{dR}{dt} &= \alpha U_n \frac{\rho_u}{\rho_v} - \frac{1}{S_f} \frac{V_v}{\gamma_v} \frac{1}{P_0} \frac{dP}{dt}; \\ \frac{d\xi}{dt} &= (\bar{P} - P_0) \frac{l^2 b}{2I}; \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \xi; \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где ρ_u — плотность горючей смеси;

ρ_v — плотность продуктов горения;

U_n — нормальная скорость горения;

m_v — масса горючей смеси;

V_v — показатель адиабаты продуктов горения;

V_u — показатель адиабаты горючей смеси;

ξ — коэффициент, учитывающий расстояние между преградами;

$\bar{P}$ — среднее давление;

$S_{\text{отв}}^{\text{эл}}$ — площадь проема, через который происходит истечение;

I — интенсивность истечения горючей смеси;

$P_{\text{вск}}$ — давление вскрытия;

$t_{\text{вск}}$ — время вскрытия.

Системы уравнений (14)–(18) решались методом Рунге–Кутты. Для решения их была составлена программа для ЭВМ. Решение системы осуществлялось последовательно в четыре этапа:

- на первом этапе рассматривался процесс взрывного горения ГВС в замкнутом объеме, т. е. решались уравнения (8) и (9);
- на втором этапе рассматривался процесс взрывного горения и вскрытия отверстия при одновременном истечении из объема холодной смеси, т. е. решались уравнения (8), (9) и одно из уравнений, описывающих движение ЛСК, (9)–(13);

- на третьем этапе рассматривался процесс вскрытия отверстия и истечения из объема как горючей смеси, так и продуктов горения;
- на четвертом этапе рассматривалось истечение из объема помещения сгоревшей смеси при полностью открытых отверстиях в наружном ограждении помещения, т. е. решалось уравнение (8).

Результаты решения приведенных систем уравнений приведены на рис. 3–9. На рис. 3 и 4 представлены графики характера изменения давления на ограждающие конструкции помещений кубической формы объемом 100, 1000 и 5000 м³ при решении системы уравнений (14), когда смещаемые элементы ЛСК расположены в покрытии; на рис. 5 и 6 — при решении системы уравнений (15); на рис. 7 и 8 — при решении системы уравнений (16). На рис. 9 приведен график изменения характера давления взрыва ГВС на ограждающие конструкции помещения кубической формы объемом 100 м³ при решении системы уравнений (18).

Анализ приведенных графических зависимостей показывает, что при взрыве ГВС внутри помещения и вскрытии ЛСК, как правило, независимо от ее вида возникает два пика давления, величина которых определяется давлением, при котором начинают вскрываться элементы ЛСК, и общей площадью открытых отверстий в наружном ограждении. Кроме того, решение приведенных систем уравнений позволяет проанализировать влияние отдельных параметров и их комплекса на величину и характер давлений, возникающих внутри помещений, и установить их оптимальное сочетание для снижения давлений до необходимых безопасных значений.

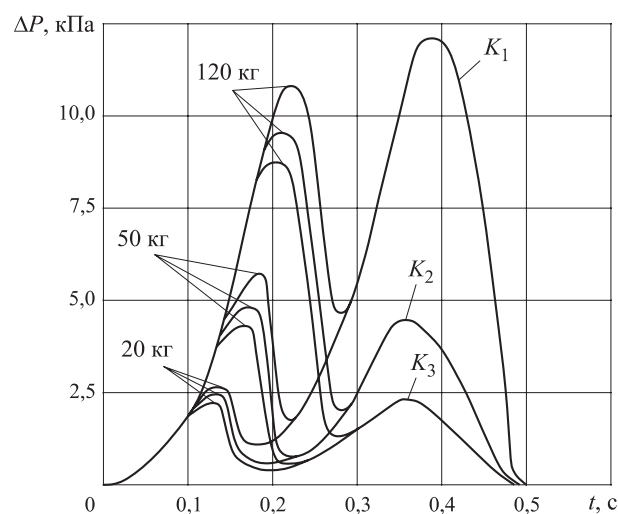


Рис. 3. Характер изменения давления ΔP на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м³ при взрывном горении ГВС и вскрытии ЛСК с массой 1 м² 20, 50 и 120 кг в покрытии по уравнениям (14) при $K_1 = 0,139$, $K_2 = 0,232$, $K_3 = 0,326$ ($K_1 = S_{отв1}/V^{2/3}$, $K_2 = S_{отв2}/V^{2/3}$, $K_3 = S_{отв3}/V^{2/3}$), $U_n = 0,45$ м/с, $\rho_u/\rho_v = 7,5$; $\alpha = 2$

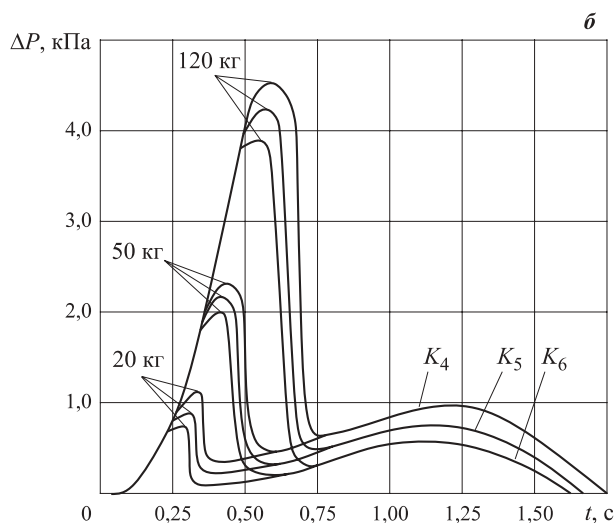
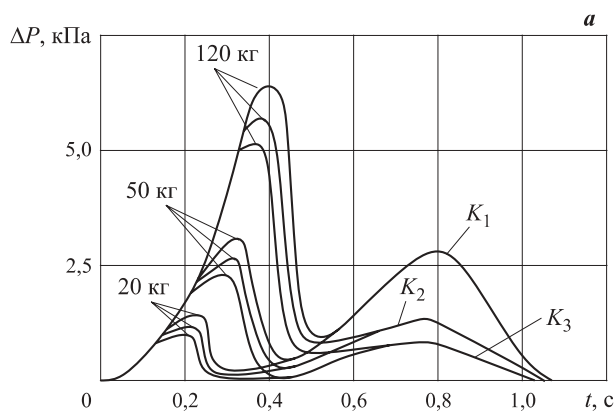


Рис. 4. Характер изменения давления ΔP на ограждающие конструкции помещения объемом 1000 м³ (а) и 5000 м³ (б) при взрывном горении ГВС и вскрытии ЛСК в покрытии с массой 1 м² 20, 50 и 120 кг по уравнениям (14) при $K_1 = 0,301$, $K_2 = 0,502$, $K_3 = 0,703$, $K_4 = 0,516$, $K_5 = 0,86$, $K_6 = 1,2$, $U_n = 0,45$ м/с, $\rho_u/\rho_v = 7,5$, $\alpha = 2$

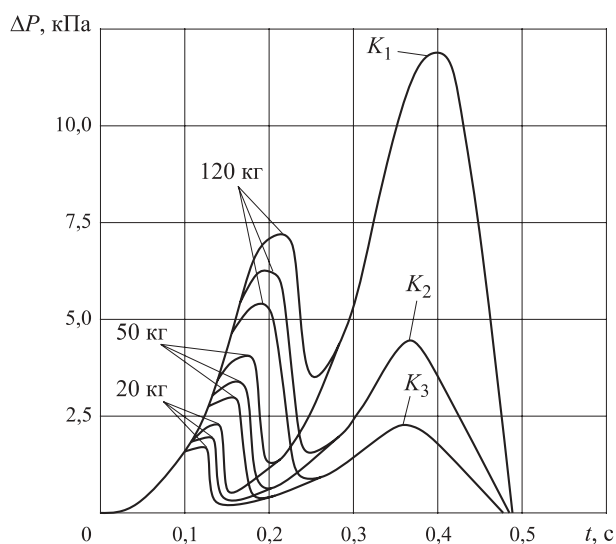


Рис. 5. Характер изменения давления ΔP на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м³ при взрывном горении ГВС и вскрытии ЛСК с массой 1 м² 20, 50 и 120 кг в стеновом ограждении по уравнениям (15) при $K_1 = 0,139$, $K_2 = 0,232$, $K_3 = 0,326$; $U_n = 0,45$ м/с; $\rho_u/\rho_v = 7,5$; $\alpha = 2$

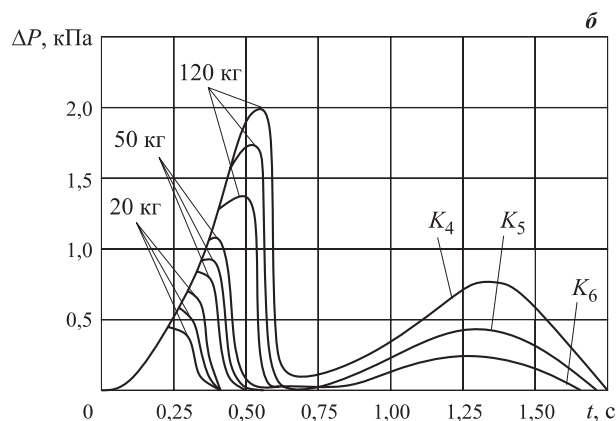
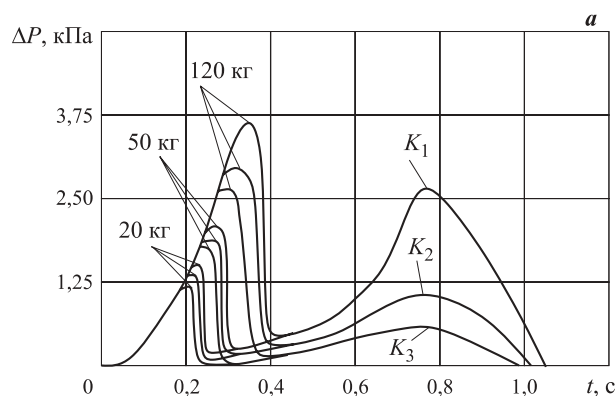


Рис. 6. Характер изменения давления ΔP на ограждающие конструкции помещения объемом 1000 м^3 (а) и 5000 м^3 (б) при взрывном горении ГВС и вскрытии поворотных ЛСК с массой 1 м^2 20, 50 и 120 кг в вертикальном стеновом ограждении по уравнениям (15) при $K_1 = 0,301$, $K_2 = 0,502$, $K_3 = 0,703$, $K_4 = 0,516$, $K_5 = 0,86$, $K_6 = 1,2$, $U_n = 0,45 \text{ м/с}$, $\rho_u/\rho_v = 7,5$, $\alpha = 2$

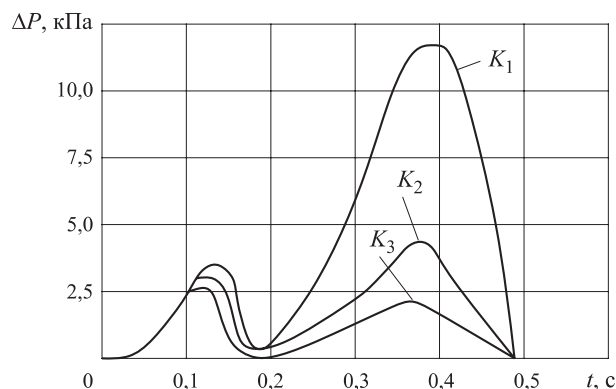


Рис. 7. Характер изменения давления ΔP на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м^3 при взрывном горении ГВС и вскрытии поворотных ЛСК с массой 1 м^2 20 кг по уравнениям (16) при $K_1 = 0,139$, $K_2 = 0,232$, $K_3 = 0,326$, $U_n = 0,45 \text{ м/с}$, $\rho_u/\rho_v = 7,5$, $\alpha = 2$

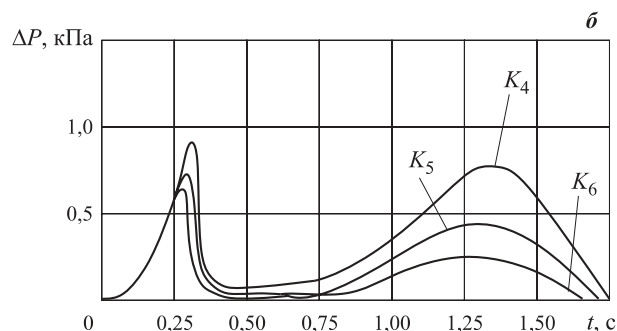
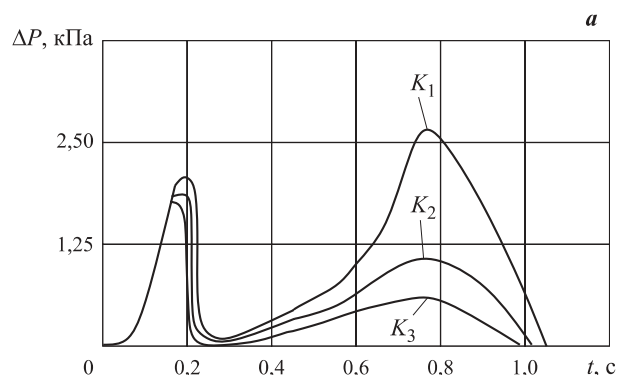


Рис. 8. Характер изменения давления ΔP на ограждающие конструкции помещения объемом 1000 м^3 (а) и 5000 м^3 (б) при взрывном горении ГВС и вскрытии поворотных ЛСК с массой 1 м^2 20 кг с горизонтальным верхним шарниром в стеновом ограждении по уравнениям (16) при $K_1 = 0,301$, $K_2 = 0,502$, $K_3 = 0,703$, $K_4 = 0,516$, $K_5 = 0,86$, $K_6 = 1,2$, $U_n = 0,45 \text{ м/с}$, $\rho_u/\rho_v = 7,5$, $\alpha = 2$

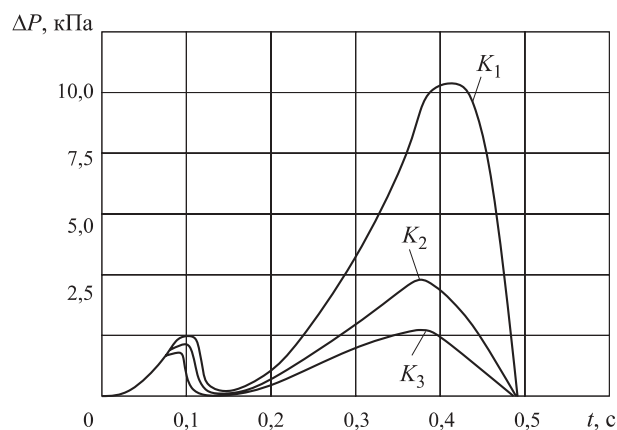


Рис. 9. Характер изменения давления ΔP на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м^3 при взрывном горении ГВС и вскрытии поворотных ЛСК с массой 1 м^2 20 кг в стеновом ограждении с вертикальным шарниром по уравнениям (18) при $K_1 = 0,139$, $K_2 = 0,232$, $K_3 = 0,326$, $U_n = 0,45 \text{ м/с}$, $\rho_u/\rho_v = 7,5$, $\alpha = 2$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин В. С., Бабушок В. И. О начальной стадии горения газа в замкнутом объеме // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 1. — С. 24–29.
2. Бабкин В. С., Бабушок В. И., Михайлова Л. Г. Влияние термодинамических и кинетических параметров на динамику сгорания газа в сферическом сосуде // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 6. — С. 14–20.

3. Bradley D., Mitcheson A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I — Theory // Combustion and Flame. — 1978. — Vol. 32. — P. 221–236.
4. Bradley D., Mitcheson A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels // Combustion and Flame. — 1976. — Vol. 26. — P. 201–217.
5. Беляев В. В., Орлов Г. Г., Расторгуев С. Б. Определение давления в объеме с учетом постепенного вскрытия ЛСК при взрывном горении ГВС // Тезисы II Всесоюзной научной конференции МИСиС. — М., 1983. — 114 с.
6. Козарко С. М. Исследование давления в торце трубы при нестационарном быстром горении // Журнал технической физики. — 1958. — Т. 28, вып. 9. — С. 2041–2045.
7. Козарко С. М. Детонация метановоздушных смесей и пределы детонации углеводородно-воздушных смесей в трубе большого диаметра // Журнал технической физики. — 1958. — Т. 28, вып. 9. — С. 2072–2083.
8. Маркштейн Дж. Г. Нестационарное распространение пламени. — М. : Мир, 1968. — 437 с.
9. Мольков В. В., Некрасов В. П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 17–24.
10. Пилюгин Л. П. Нагрузки, возникающие при взрывном горении ГВС в помещениях взрывоопасных производств // Взрывобезопасность в строительстве : сб. трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. — М., 1983. — С. 77–87.
11. Пилюгин Л. П. Прогнозирование последствий внутренних аварийных взрывов — М. : Пожнаука, 2010. — 379 с.
12. Фролов С. М. Ускорение перехода горения в детонацию в газах: от К. И. Щелкина до наших дней // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 13–24.
13. Фролов С. М. Пределы газовой детонации и перехода горения в детонацию: возможно ли моделирование? // Горение и взрыв / Под общ. ред. С. М. Фролова. — М. : Торус Пресс, 2013. — Вып. 6. — С. 339–341.

Материал поступил в редакцию 5 января 2015 г.

English

DETERMINATION OF THE VALUE AND CHARACTER OF THE EXPOSIVE LOADS IN CASE OF USING OF THE INERTIAL SAFETY CONSTRUCTIONS

ORLOV G. G., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

KOROLCHENKO D. A., Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

KOROLCHENKO A. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

It is shown that solving of the practical problems of protection of industrial buildings and constructions requires to the same extent to choose correctly the size and parameters of safety constructions in order to ensure decrease of arising loads up to the safe values and to calculate the bearing structures on dynamic stability while retaining their carrying capacity, and for this purpose it is necessary to define loadings arising in case of explosion of gas mixtures inside premises. Assumption which become the basis for mathematical model describing dynamics of flammable mixtures combustion in a volume taking into account their expiration are given. Design schemes for definition of loads on constructions in case of explosion of flammable mixtures in different volumes with various types of blast-relief panels (BRP) are given. Systems of equations determining the value and character of loads on enclosing structures using different types of inertial BRP are given. The program for solution of these systems on computer is made.

Keywords: explosive loads; safety constructions; flammable gas-, steam- and dust-air mixtures; stability of bearing structures; explosion protection.

REFERENCES

1. Babkin V. S., Babushok V. I. O nachalnoy stadii goreniya gaza v zamknutom obyeme [Initial stage of gas combustion in a closed volume]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1977, vol. 13, no. 1, pp. 24–29.
2. Babkin V. S., Babushok V. I., Mikhailova L. G. Vliyaniye termodinamicheskikh i kineticheskikh parametrov na dinamiku sgoraniya gaza v sfericheskom sosude [Effect of thermodynamic and kinetic parameters on gas-combustion dynamics in a spherical vessel]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1979, vol. 15, no. 6, pp. 14–20.
3. Bradley D., Mitcheson A. The venting of gaseous explosions in spherical vessels. I — Theory. *Combustion and Flame*, 1978, vol. 32, pp. 221–236.
4. Bradley D., Mitcheson A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels. *Combustion and Flame*, 1976, vol. 26, pp. 201–217.
5. Belyaev V. V., Orlov G. G., Rastorguev S. B. Opredeleyeniye davleniya v obyeme s uchetom postepen-nogo vskrytiya LSK pri vzryvnom goreнии GVS [Determination of pressure in a volume taking into account gradual opening of BRP during explosive burning of gas-air mixture]. *Tezisy II Vsesoyuznoy nauchnoy konferentsii MISiS* [Abstracts of II All-Union Scientific Conference of Moscow Institute for Steel and Alloys]. Moscow, 1983. 114 p.
6. Kogarko S. M. Issledovaniye davleniya v tortse truby pri nestatsionarnom bystrom goreнии [Research of pressure in a pipe bearing face in case of non-stationary fast burning]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 1958, vol. 28, issue 9, pp. 2041–2045.
7. Kogarko S. M. Detonatsiya metanovozdushnykh smesey i predely detonatsii uglevodorodno-vozdushnykh smesey v trube bolshogo diametra [Detonation of methane-air mixtures and detonation limits of hydrocarbon-air mixtures in a pipe of big diameter]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 1958, vol. 28, issue 9, pp. 2072–2083.
8. Markstein J. G. *Nestatsionarnoye rasprostraneniye plameni* [Nonsteady flame propagation]. Moscow, Mir Publ., 1968. 437 p.
9. Molkov V. V., Nekrasov V. P. Dinamika sgoraniya gaza v postoyannom obyeme pri nalichii isteche-niya [Dynamics of gas combustion in a constant volume in the presence of exhaust]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1981, vol. 17, no. 4, pp. 17–24.
10. Pilyugin L. P. Nagruzki, vznikayushchiye pri vzryvnom goreнии GVS v pomeshcheniyakh vzryvo-opasnykh proizvodstv [Loadings arising during explosive burning of gas-air mixture in explosive production premises]. *Vzryvobezopasnost v stroitelstve: sb. trudov MISI im. V. V. Kuybysheva* [Explosion safety in construction. Proceedings of Moscow Construction Institute named after V. V. Kuibyshev]. Moscow, 1983, pp. 77–87.
11. Pilyugin L. P. *Prognozirovaniye posledstviy vnutrennikh avariynykh vzryvov* [Prognostication of consequences of internal emergency explosions]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2010. 379 p.
12. Frolov S. M. Acceleration of the deflagration-to-detonation transition in gases: From Shchelkin to our days. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 258–268. doi: 10.1134/S0010508212030021.
13. Frolov S. M. (ed.). *Predely gazovoy detonatsii i perekhoda goreniya v detonatsiyu: vozmozhno li modelirovaniye?* [Limits of gas detonation and transition of burning into detonation: whether modeling is possible?]. *Goreniye i vzryv* [Combustion and Explosion]. Moscow, Torus Press Publ., 2013, issue 6, pp. 339–341.