



Влияние легкобрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении

Вячеслав Александрович Горев, Антон Дмитриевич Корольченко ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе рассматривается аварийный взрыв газа в помещении при условии сброса давления через проемы, в которых были установлены легкобрасываемые конструкции.

Решение данной проблемы актуально для защиты от последствий взрыва в жилых зданиях. Это связано с тем, что объемы помещений в жилых зданиях невелики по сравнению с промышленными зданиями, что определяет более жесткие условия сброса давления в начальный момент развития взрыва. В работе показано, что в малом объеме за время движения легкобрасываемой конструкции в проеме до момента начала сброса давления оно может достигнуть критических значений.

Цели. В работе ставится цель определить формирование взрывных нагрузок начиная с момента взрыва до формирования максимального значения давления с учетом свойств легкобрасываемых конструкций и закономерности их вскрытия. Такая цель обусловлена тем, что до настоящего времени формирование давления на этой стадии рассматривалось без учета места установки легкобрасываемых конструкций по глубине стенового проема. Основное внимание при этом уделялось подбору площади проема.

Методы. С использованием метода теории размерностей, численного и аналитического моделирования процессов взрыва, истечения газов и движения твердого тела получены безразмерные комплексы, которые описывают формирование взрывной нагрузки до момента достижения ее максимального значения. Эти комплексы позволяют определить взрывные нагрузки для помещений разного объема, что также является новым результатом.

Результаты. В настоящей работе выявлено влияние на конечный результат отдельных факторов, таких как: объем помещения; давление, при котором легкобрасываемая конструкция начинает движение; масса и глубина установки легкобрасываемой конструкции в проеме; периметр проема и скорость взрывного горения.

Выводы. Результаты, полученные в процессе работы, позволяют определять динамическую нагрузку взрыва на стадии ее роста. Знание этой величины дает возможность более надежно устанавливать несущие характеристики конструкций при аварийных взрывах в жилых помещениях.

Ключевые слова: взрыв газа; горючий газ; взрывные нагрузки; взрывопожароопасность помещений; сброс давления; заглубление предохранительной конструкции

Для цитирования: Горев В.А., Корольченко А.Д. Влияние легкобрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 3. С. 12–23. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.12-23

✉ Корольченко Антон Дмитриевич, e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

The effect of venting structures on overpressure caused by an indoor explosion

Vyacheslav A. Gorev, Anton D. Korolchenko ✉

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers an accidental indoor gas explosion on condition of pressure relief through openings in which venting structures were installed.

A solution to this problem can protect residential buildings from consequences of explosions due to the fact that the volume of premises in residential buildings is small compared to industrial buildings, and it determines more stringent pressure relief conditions at the initial moment of the explosion development. The article shows that pressure can reach critical values in a small space during the motion of a venting structure in the opening before the onset of pressure relief.



Goals. The authors aim to identify the pattern of blast load development from the moment of explosion to the attainment of the maximum pressure value with account taken of the properties of venting structures and patterns of their opening. This goal is relevant due to the fact that until now at this stage pressure development has been considered without any account taken of how deeply the venting structure is installed in the wall opening. Much attention was focused on the selection of the opening size.

Methods. The methods of the theory of dimensions, numerical and analytical modeling of explosion processes, patterns of gas escape and rigid body motion were applied to obtain dimensionless groups describing the development of an explosive load until maximum values. These dimensionless groups allow identifying explosive loads for rooms having different volumes, which is also a new result.

Results. In this work, the influence of individual factors on the ultimate result has been identified. These factors are the room volume, the pressure at which the venting structure starts moving, the mass and position of the venting structure in the opening, the opening perimeter and the rate of explosive combustion.

Conclusions. The results, obtained in the course of this work, allow identifying the dynamic load of an explosion at the stage of its growth. This value can be used to set more reliable bearing characteristics of structures for cases of accidental explosions in living accommodations.

Keywords: gas explosion; combustible gas; explosive load; explosion and fire hazards on premises; pressure relief; embedment of a safety structure

For citation: Gorev V.A., Korolchenko A.D. The effect of venting structures on overpressure caused by an indoor explosion. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):12-23. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.12-23 (rus).

✉ Anton Dmitrievich Korolchenko, e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

Введение

Аварийные взрывы газо- и пылевоздушных смесей в помещениях приводят к значительному материальному ущербу и человеческим жертвам. В последнее время в нашей стране участились взрывы смесей природного газа в жилом секторе. Характер разрушений в результате взрыва свидетельствует о том, что меры по снижению взрывных нагрузок оказываются неэффективными. В первую очередь это относится к мероприятиям, направленным на снижение давления взрыва путем сброса давления через открывающиеся проемы, которые до взрыва были закрыты легкобрасываемыми конструкциями (ЛСК). На начальной стадии взрыва при низком давлении связи, удерживающие эти конструкции в системе ограждающих конструкций, разрушаются, что приводит ЛСК в движение. В результате происходит открытие пространства для сброса давления.

Для обеспечения защиты здания от разрушения необходимо, чтобы площадь проемов, открытых ЛСК, была достаточной и их открытие было быстрым.

Первое требование означает, что через полностью открытые проемы сброс давления должен происходить быстрее, чем его нарастание при максимальной скорости выделения энергии. При этом давление в объеме не должно превышать допустимое. Второе требование относится к легкобрасываемым конструкциям и их закреплению. Оно сводится к возможности обеспечивать сброс давления до требуемого уровня при неполноте открытого проема во время начала движения ЛСК.

В работах [1, 2], по-видимому, впервые был выполнен анализ проблемы внутренних взрывов с помощью теории подобия и получены определя-

ющие соотношения в безразмерных комплексах. При этом безразмерные комплексы были одинаковыми для изначально разгерметизированных объемов и для объемов, которые разгерметизировались во время взрыва. Главный результат работ [1, 2] сводится к определению граничных значений безразмерных комплексов, внутри которых находятся все известные к моменту публикации этих работ результаты. Позднее были получены данные [3–8], которые не подтверждали выводы, сделанные авторами работ [1, 2]. Эти расхождения можно объяснить высокой скоростью турбулентного горения [3, 4] или невыполнением условий квазистационарности взрывов в тех случаях [5–8], когда прослеживаются волновые эффекты. В работах [1, 2] характер взрыва предполагался квазистационарным, а безразмерная скорость горения основана на ламинарном горении, без учета сильной турбулентности.

При аварийных взрывах горение часто турбулизируется из-за присутствия преград. Это положение подтверждается экспериментально [9–11] и при численном моделировании взрыва в условиях загроможденного пространства [12–14].

Сравнение результатов, полученных для объемов, которые разгерметизировались в момент взрыва, не проводилось. Однако можно с уверенностью утверждать, что в этом случае отклонения от данных, представленных в [1, 2], могут быть значительными.

Безразмерные комплексы для таких случаев не учитывают ряд параметров, от которых с очевидностью зависит давление взрыва на начальной стадии его развития. К ним следует отнести: давление разрушения связей, удерживающих легкобрасываемые конструкции; инерционность этих конструкций, от которой зависит скорость их дви-

жения; глубина установки конструкции в проеме, так как только после смещения ЛСК на эту величину начинается сброс давления. Кроме того, важное значение имеет периметр открытого проема, поскольку на начальной стадии его открытия сброс давления происходит через площадь, определяемую периметром проема и смещением конструкции после выхода из него.

В работах [15–17] изучено влияние инерционности конструкций на формирование взрывной нагрузки. Влияние момента начала вскрытия и глубины установки конструкции при этом оказалось вне поля зрения авторов.

В предлагаемой работе предпринята попытка предложить безразмерные комплексы, которые позволят описать формирование взрывной нагрузки на начальной стадии развития взрыва с учетом сброса давления.

В работе учитывается также влияние глубины установки легкобрасываемых конструкций в проеме на формирование взрывной нагрузки. Это особенно важно для помещений жилого комплекса объемом менее 120 м³.

Ранее в работах [18–20] было показано, что при взрыве в таких помещениях давление может достигать критических значений еще до выхода ЛСК из проема. В работе [21] был рассмотрен вопрос о движении поворотной легкобрасываемой конструкции, заглубленной в проеме. Экспериментальное масштабное моделирование было проведено в [22] при условии равенства давлений вскрытия для модели и натуре. Время достижения максимума давления после выхода конструкции из проема определено в [23], но при этом не было установлено его значение.

До настоящего времени площадь проемов, перекрытых ЛСК, назначалась в зависимости от объема помещения по правилам, разработанным для промышленных помещений большого объема. В таких помещениях максимальное давление взрыва формируется к моменту достижения максимальной мощности взрыва, когда проемы для сброса давления открыты полностью. Именно при этом давлении проверяются конструкции на несущую способность [1, 2, 24–27].

В помещениях малого объема, например в кухнях, где происходили взрывы с катастрофическими последствиями, площади проемов намного превышали площади, требуемые по правилам. В предлагаемой работе рассматривается полный цикл движения легкобрасываемой конструкции с учетом ее движения в проеме до формирования максимума давления. Определяется этот максимум давления, и показывается, что он может быть значительно больше того, который формируется

при максимальной мощности взрыва. Другими словами, в работе решается вопрос о нарастании взрывной нагрузки до максимального значения давления в начальный период развития взрыва с учетом закрепления и инерционности ЛСК, объема помещения, периметра проема и его площади. До формирования пика давления на этом этапе площадь истечения газов определяется периметром проема и скоростью ЛСК при выходе из него. Именно на этом участке определяются динамические характеристики нагрузки.

Методы исследования

При квазистационарном взрыве в замкнутом объеме давление непрерывно растет до достижения максимального значения в несколько сот кПа. Например, при взрыве стехиометрической смеси метана эта величина равна 960 кПа. Типичное значение допускаемого избыточного давления для обеспечения устойчивости промышленных и жилых зданий составляет около 5 кПа. Таким образом, с помощью легкобрасываемых конструкций необходимо снизить максимальное давление взрыва более чем в 100 раз. При этом конструкция должна начинать смещение при давлении 1–2 кПа, в зависимости от ветрового района. Открытие пространства для истечения должно происходить быстро, чтобы компенсировать рост давления за счет развития очага взрыва. Открытое полностью пространство для сброса давления должно обеспечивать условие $P_2 \leq P_{\text{доп}}$ (где P_2 — давление в объеме при максимальной скорости выделения энергии в процессе взрыва; $P_{\text{доп}}$ — допустимое давление взрыва, определяемое из условия предельного равновесия защищаемых конструкций).

При рассматриваемых давлениях возможны важные предположения:

- объемная скорость истечения описывается соотношением:

$$\Delta \dot{V} = K_{\text{ист}} S_0 \sqrt{2 \Delta P_{(t)} / \rho_c}; \quad (1)$$

- давление в замкнутом объеме на начальной стадии развития взрыва определяется зависимостью:

$$\Delta P(t) = P_{\text{отк}} (t/t_{\text{отк}})^3, \quad (2)$$

где $K_{\text{ист}}$ — коэффициент истечения газа;

S_0 — открытая площадь для истечения;

ρ_c — плотность истекающих продуктов сгорания;

$P_{\text{отк}}$ — давление в момент открытия проема;

$t_{\text{отк}}$ — время открытия проема для начала сброса давления.

Максимальное давление в разгерметизированном объеме P_2 достигается при условии равенства

скорости образования нового объема в результате горения в момент максимальной скорости взрыва и объемной скорости истечения при сбросе давления:

$$(U_r \cdot A_f)_{\max} (\sigma - 1) = K_{\text{ист}} S_0 \sqrt{2P_2/\rho_c}, \quad (3)$$

где $(U_r \cdot A_f)$ — произведение скорости горения на площадь пламени, которое обычно достигает максимума при максимальном значении площади пламени в момент касания им ограждения;

$\sigma = \rho_0/\rho_c$ — отношение плотности исходной горючей смеси ρ_0 к плотности продуктов сгорания, которое не изменяется в течение взрыва: на начальной стадии сброса давления истекает холодная исходная смесь, а в момент максимальной мощности взрыва истекают горячие продукты сгорания плотностью ρ_c .

Площадь пламени зависит от объема помещения V_0 и формы пламени, учитываемой коэффициентом K_f :

$$A_f = K_f V_0^{2/3}. \quad (4)$$

В результате из (3) и (4) следует:

$$S_0 = \frac{K_f V_0^{2/3} U_r (\sigma - 1) \rho_0^{1/2}}{2^{1/2} K_{\text{ист}} P_2^{1/2} \sigma^{1/2}}. \quad (5)$$

Выражение (5) можно использовать в безразмерном виде:

$$\bar{S}_0 = \frac{S_0 P_0^{1/2}}{V_0^{2/3} U_r \rho_0^{1/2}} = \frac{K_f}{K_{\text{ист}}} (\sigma - 1) \left(\frac{P_0}{2P_2 \sigma} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где P_0 — атмосферное давление, кПа.

Выражение (6) соответствует связи между безразмерными комплексами работ [1, 2] для случая взрыва в разгерметизированном объеме при условиях данной постановки задачи.

В работах [18–20] проанализировано влияние глубины установки ЛСК в проеме, инерционности конструкции, давления разрушения связей легко-сбрасываемой конструкции, площади и периметра

проема, скорости горения и объема помещения на формирование взрывной нагрузки в начальный момент взрыва. Движение ЛСК в проеме определяется параметром B :

$$B = \frac{P_{\text{вск}}^{5/3} V_0^{2/3} (K_2/\gamma)^{2/3}}{\rho_n X_0 U_{r1}^2 P_0^{2/3} ((\sigma - 1)\sigma^2)^{2/3}}, \quad (7)$$

где K_2 — коэффициент, учитывающий форму очага взрыва на начальной стадии; для сферического очага горения $K_2 = 3/(4\pi)$;

γ — показатель адиабаты;

ρ_n — масса единицы площади конструкции;

$\rho_n = m/S_0$

X_0 — глубина установки панели в проеме (рис. 1);

U_{r1} — скорость взрывного горения в момент вскрытия проема.

После смещения легко-сбрасываемой конструкции на глубину установки X_0 начинается истечение газа из объема и сброс давления. До момента начала истечения давление в объеме определяется соотношением (2), а время начала истечения $t_{\text{отк}}$ устанавливается из выражения:

$$\frac{4}{B} = [K_1^5/5 - K_1 + 0,8], \quad (8)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий отношение времени начала сброса давления к времени начала движения конструкции при давлении $P_{\text{вск}}$, задаваемом при проектировании ЛСК;

$K_1 = t_{\text{отк}}/t_{\text{вск}}$;

$t_{\text{вск}}$ — время достижения давления $P_{\text{вск}}$.

Время достижения давления $P_{\text{вск}}$ определяется из (2):

$$t_{\text{вск}} = \left(\frac{K_2 P_{\text{вск}} V_0}{P_0 U_r^3 \gamma (\sigma - 1) \sigma^2} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

В табл. 1 дается представление о связи между параметром B и временем, которое ЛСК движется в проеме, и давлением в помещении в эти моменты времени.

Таблица 1. Связь между параметром B и движением легко-сбрасываемой конструкции в проеме

Table 1. Relationship between parameter B and the motion of a venting structure in the opening

Показатель Indicator	Параметр B Parameter B									
	0,5	1	2	4	8	10	16	22,8	33,18	50
K_1	2,16	1,91	1,71	1,54	1,41	1,37	1,306	1,26	1,22	1,18
$P_{\text{отк}}/P_{\text{вск}}$ $P_{\text{ор}}/P_0$	10,08	7	5	3,65	2,8	2,6	2,23	2,00	1,816	1,643

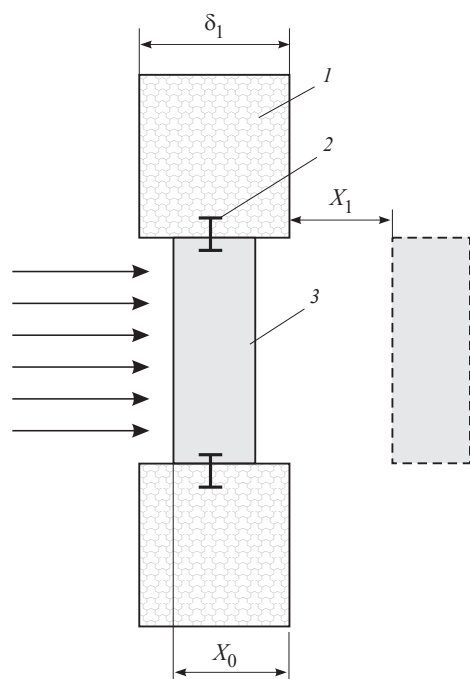


Рис. 1. Расположение легкобрасываемой конструкции в проеме: 1 — ограждающая конструкция (стена здания); 2 — крепление ЛСК; 3 — легкобрасываемая конструкция; X_0 — глубина установки; $X_1 = S_0/\Pi$ (Π — периметр проема)

Fig. 1. Location of the venting structure in the opening: 1 is the enclosing structure (the building wall); 2 is the venting structure fastener; 3 is the venting structure; X_0 is the installation depth; $X_1 = S_0/\Pi$ (Π — perimeter of the opening)

Если требуемую площадь открытых проемов определять исходя из условий при максимальной мощности взрыва (5) и (6), то необходимо задать давление P_2 (допускаемое). Это давление определяется из условий предельного равновесия защищаемых конструкций при их статическом нагружении. Для изгибаемых балочных конструкций это условие сводится к отношению:

$$M_{\text{изг}}/Z_p \leq \sigma_T, \quad (10)$$

где $M_{\text{изг}}$, Z_p — внешний изгибающий момент в сечении с пластическим моментом сопротивления изгибу;

σ_T — предел текучести изгибаемого материала.

После определения допускаемого давления, например, как это делается в [21, 22], изгибающий момент описывается уравнением:

$$M_{\text{изг}} = \alpha P_2 b L^2, \quad (11)$$

где α — коэффициент, учитывающий характер закрепления изгибаемой конструкции;

b — ширина полосы сбора нагрузки;

L — расчетная длина изгибаемой конструкции.

В дальнейшем, определив безразмерную площадь $\bar{S}_0$ по (6), следует перейти к анализу действия легкобрасываемой конструкции после начала сброса давления, т.е. после $t_{\text{отк}}$.

С момента начала сброса давления динамика его изменения в объеме будет по-прежнему определяться комплексом B и еще двумя новыми комплексами:

$$\bar{S}_1 = \frac{S_0 (P_0/P_{\text{вск}})^{1/6} (P_0/\rho_0)^{1/2}}{U_r [(\sigma-1)\sigma^2]^{1/3} V_0^{2/3}}, \quad (12)$$

$$B_1 = \frac{(K_2/\gamma)^{2/3} P_{\text{вск}}^{5/3} V_0^{2/3} \Pi}{((\sigma-1)\sigma^2)^{2/3} P_0^{2/3} S_0 \rho_n U_r^2}. \quad (13)$$

Нетрудно заметить, что параметры $\bar{S}_1$ и $\bar{S}_0$ можно связать между собой, а комплекс B_1 получается из комплекса B заменой глубины установки легкобрасываемой конструкции X_0 на отношение S_0/Π . В комплексе B_1 появляется новый параметр — периметр проема Π . Это значит, что скорость сброса давления на участке, где проем открыт не полностью, определяется периметром проема, а не его площадью. Этот участок заканчивается, когда смещение ЛСК от места выхода из проема достигнет величины:

$$X_1 = S_0/\Pi.$$

Комплекс $\bar{S}_1$ связан с комплексом B_1 соотношением

$$B_1 = (K_2/\gamma)^{2/3} (\bar{W}^3 \bar{S})^{-1}, \quad (14)$$

где

$$\bar{W}^3 = \frac{U_r^3 (\sigma-1) \sigma^2 \rho_n \rho_0^{1/2}}{\Pi P_{\text{вск}}^{3/2}}.$$

Таким образом, разработан аппарат для анализа изменения давления внутреннего взрыва с учетом влияния движения ЛСК и начала сброса давления. Основное внимание уделено начальной стадии развития взрыва, когда проем для сброса давления открыт еще не полностью. Это особенно важно при взрывах в помещениях небольшого объема и в случае заглубления легкобрасываемых конструкций внутри проема. Легкобрасываемая конструкция считается заглубленной на глубину X_0 , если для освобождения пространства для начала истечения газов ЛСК необходимо переместиться на расстояние X_0 . В настоящей работе представлены новые безразмерные параметры $\bar{S}_1$ (12) и B_1 (13), которые, наряду с параметром B , определяют дина-

мику давления взрыва в период от начала сброса давления до полного открытия проема при смещении после выхода из него ЛСК на расстояние X_1 .

В этом состоит основное отличие настоящей работы от [15–17], где не учитывалась глубина установки ЛСК, и от работ [18–24], в которых изучалась динамика давления при движении ЛСК только в зоне заглубления.

Результаты исследования и их обсуждение

Из табл. 1 следует, что при $B \leq 10$ давление в объеме может достигать опасных значений еще до начала его сброса. В этом случае необходимо тщательно подбирать давление вскрытия $P_{вск}$ (по возможности, с учетом ветровых нагрузок), сводя его к минимуму. Уменьшение глубины установки и массы легкообрасываемой конструкции также улучшает ситуацию. Для помещений больших объемов параметры B и B_1 больше, а это означает, что на стадии открытия проемов взрыв в больших помещениях протекает с меньшей угрозой достижения критических значений давления. Кроме того, при квазистатическом взрыве в больших объемах характер нагрузки менее динамичный. Условие, при котором давление $P_{отк}$ на момент начала его сброса будет больше P_2 , имеет вид:

$$K_1 > (P_2/P_{вск})^{1/3}. \quad (15)$$

Анализ решений модельных уравнений показывает, что максимальное давление и время его достижения на стадии взрыва до полного открытия проема определяются комплексами B , B_1 и $\bar{S}_1$. В случае, когда ЛСК не заглублена, т.е. $X_0 = 0$ и $B \rightarrow \infty$, а $K = 1$, давление определяется комплексами B_1 и $\bar{S}_1$ или $\bar{W}^3$.

Для анализа зависимости параметров первого пика от комплексов B , B_1 и $\bar{S}_1$ рассматриваются определенные значения $\bar{S}_1$, которые соответствуют значениям $\bar{S}_0$, вычисляемым по (6) при различных значениях $\bar{P}_2$. В табл. 2 дается представление о связи величин P_2 , $\bar{S}_0$ и $\bar{S}_1$.

Данные табл. 2 получены при $\sigma = 7,5$, $\rho_0 = 1,21$ кг/м³, $P_{вск} = 1,5$ кПа, $P_0 = 100$ кПа. На рис. 2 представлены результаты расчетов давления на пер-

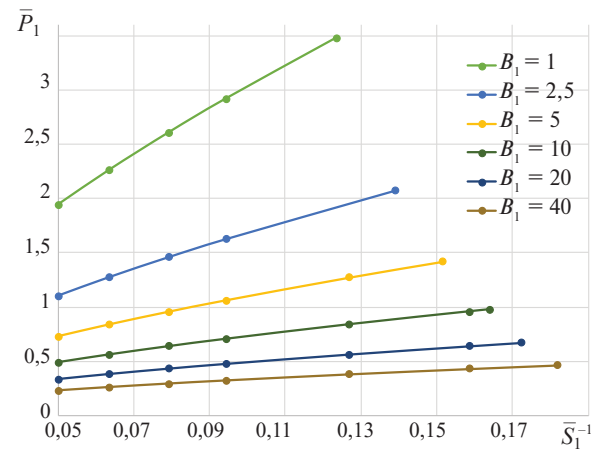


Рис. 2. Максимальное давление во время вскрытия проема, когда ЛСК не заглублена, в зависимости от B_1 (13)

Fig. 2. Maximum pressure in the process of blast opening when the venting structure is not embedded, depending on B_1 (13)

вом пике при различных значениях B_1 в зависимости от $1/\bar{S}_1$.

Из рис. 2 видно, что давление на первом пике растет с уменьшением $\bar{S}_1$ при постоянном B_1 . Точнее, давление растет по зависимости, близкой к линейной, с увеличением $1/\bar{S}_1$. Темп роста тем выше, чем меньше B_1 . При сохранении величины $\bar{S}_1$ давление будет тем больше, чем меньше B_1 . Это изменение можно охарактеризовать следующим образом. При каждом увеличении параметра B_1 в 2 раза давление уменьшается в 1,49–1,5 раза. При такой зависимости получается приблизительное соотношение:

$$\frac{P_{1,1}}{P_{1,2}} = \frac{1,495 \ln \eta}{\ln 2}, \quad (16)$$

где $\eta = B_{1,1}/B_{1,2}$; $B_{1,1}$, $B_{1,2}$ — два различных значения параметра B_1 .

Таким образом, если известно давление на первом пике при определенном значении $\bar{S}_1$, то соотношение (16) дает возможность определить это давление при другом значении параметра B_1 при том же значении площади $\bar{S}_1$ и условии $K_1 = 1$. Чтобы предсказать величину давления при другом значении $\bar{S}_1$, следует воспользоваться данными табл. 3 для опре-

Таблица 2. Безразмерная площадь проема в зависимости от допускаемого давления взрыва

Table 2. The dimensionless area of the opening depending on allowable explosion pressure

Площадь проема The area of the opening	Допускаемое давление взрыва $\bar{P}_2$ Allowable explosion pressure $\bar{P}_2$						
	2,48	4	6,25	9	16	25	49
$\bar{S}_0$	71	55,94	44,75	37,3	27,97	22,38	15,98
$\bar{S}_1$	20	15,75	12,6	10,6	7,88	6,3	4,5

Таблица 3. Связь между углом наклона линии $\Delta P_{(0)}(1/\bar{S}_1)$ и параметром B_1 **Table 3.** Relationship between the inclination angle of line $\Delta P_{(0)}(1/\bar{S}_1)$ and parameter B_1

B_1	1	2,5	5	10	20	40
$\tan \Delta P_{(0)}(1/\bar{S}_1)$	21	11,5	6,95	4,285	2,77	1,83

деления тангенса угла наклона линии $\Delta P_{(0)}(1/\bar{S}_1)$ при различных значениях параметра B_1 . Табл. 3 построена на основании данных, приведенных на рис. 2.

Значения наклона линии $\tan \Delta P_{(0)}(1/\bar{S}_1)$ для промежуточных значений параметра B_1 можно найти по линейной интерполяции.

На рис. 2 крайние правые точки соответствуют случаю, когда первый пик реализуется при полном открытии проема, т.е. при смещении ЛСК на величину $X_1 = S_0 / \Pi$. Если максимум не будет достигнут и в этом случае, то давление взрыва будет продолжать расти при постоянной площади истечения до момента достижения максимальной площади пламени. Легкосбрасываемая конструкция окажется в этом случае неэффективной. Левые концы всех линий на рис. 2 будут находиться в начале координат. В настоящей работе эта окрестность давлений не рассматривается, как практически неинтересная.

Абсолютное давление на первом пике определяется соотношением:

$$P_1 = P_{\text{вск}} + \bar{P}_1 P_{\text{вск}}.$$

Безразмерный прирост давления во время вскрытия проема устанавливается из рис. 2. В случае если давление вскрытия $P_{\text{вск}} = 1,5$ кПа, а $P_1 = 2,48$ кПа ($\bar{S}_1 = 20$, см. табл. 2), давление на первом пике будет превышать давление на втором при условии $B_1 < 6,5$.

При $P_2 = 4$ кПа и $\bar{S}_1 = 15,75$ это условие превратится в $B_1 < 1,95$. При $P_2 = 6,25$ кПа, $\bar{S}_1 = 12,6$ первый пик может быть выше второго только при условии $B_1 < 1$, а если $\bar{S}_1 < 9$, то при $B_1 = 1$. В рассмотренных выше вариантах легкосбрасываемая конструкция не была заглублена в проеме, т.е. $K_1 = 1$. Далее анализируются случаи с учетом заглубления ЛСК в проеме.

В случае заглубления ЛСК масштабом изменения давления является величина давления, соответствующая моменту выхода легкосбрасываемой конструкции из проема — $P_{\text{отк}}$.

Абсолютное давление на первом пике определяется как:

$$P_1 = K_1^3 P_{\text{вск}} + K_1^3 \bar{P}_1 P_{\text{вск}} = K_1^3 P_{\text{вск}} (1 + \bar{P}_1).$$

Далее следует анализ вскрытия заглубленных конструкций после открытия проема, т.е. после $t_{\text{отк}}$.

На рис. 3 представлена зависимость $\bar{P}_1$ от $1/\bar{S}_1$ при различных значениях K_1 и постоянном значении

$B_1 = 20$. Величина безразмерного прироста давления тем выше, чем меньше K_1 . Абсолютный прирост давления, наоборот, выше для больших значений K_1 , так как масштаб давлений при этом изменится в K_1^3 .

Абсолютное давление взрыва также растет с увеличением K_1 , что соответствует снижению параметра B (см. табл. 1).

Сравнение абсолютных давлений первого пика при $B_1 = 20$ и $\bar{S}_2 = 20,0$ при двух значениях $B = 50$ ($K_1 = 1,18$) и $B = 22,8$ ($K_1 = 1,2$) дает:

$$P_1 = 1,18^3 \cdot 1,5(1 + 0,00635) = 2,62 \text{ кПа} > P_2 = 2,48 \text{ кПа},$$

$$P_1 = 1,2^3 \cdot 1,5(1 + 0,0391) = 3,12 \text{ кПа} > P_2 = 2,48 \text{ кПа}.$$

Отдельно следует отметить влияние давления вскрытия на формирование взрывной нагрузки. Например, повышение давления вскрытия в разы ($P_{\text{вск}} = 3$ кПа) приводит к росту давления на первом пике при $\bar{S}_1 = 12,6$ до значений, превышающих величину P_2 . При этом значении давления вскрытия значение B_1 должно сохраняться за счет увеличения $\rho_{\text{п}}$ или уменьшения периметра проемов, так как B_1 растет с повышением $P_{\text{вск}}$. Влияние отдельных характеристик ЛСК, взрыва и объема помещения на формирование взрывной нагрузки требует более подробного анализа.

На рис. 4 представлены результаты вычислений в координатах $B_1 \bar{S}_1 K_1^{4,5}$ и $\bar{P}_1 K_1^3$. Вычисления про-

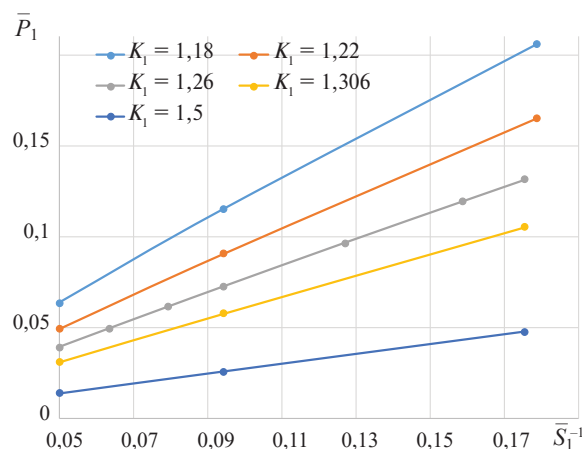


Рис. 3. Зависимость прироста давления после начала истечения от параметров $1/\bar{S}_1$ при различных значениях K_1 и постоянном значении $B_1 = 20$

Fig. 3. Dependence between the pressure rise after the onset of escape and $1/\bar{S}_1$ parameters at different K_1 values and the constant value of parameter $B_1 = 20$

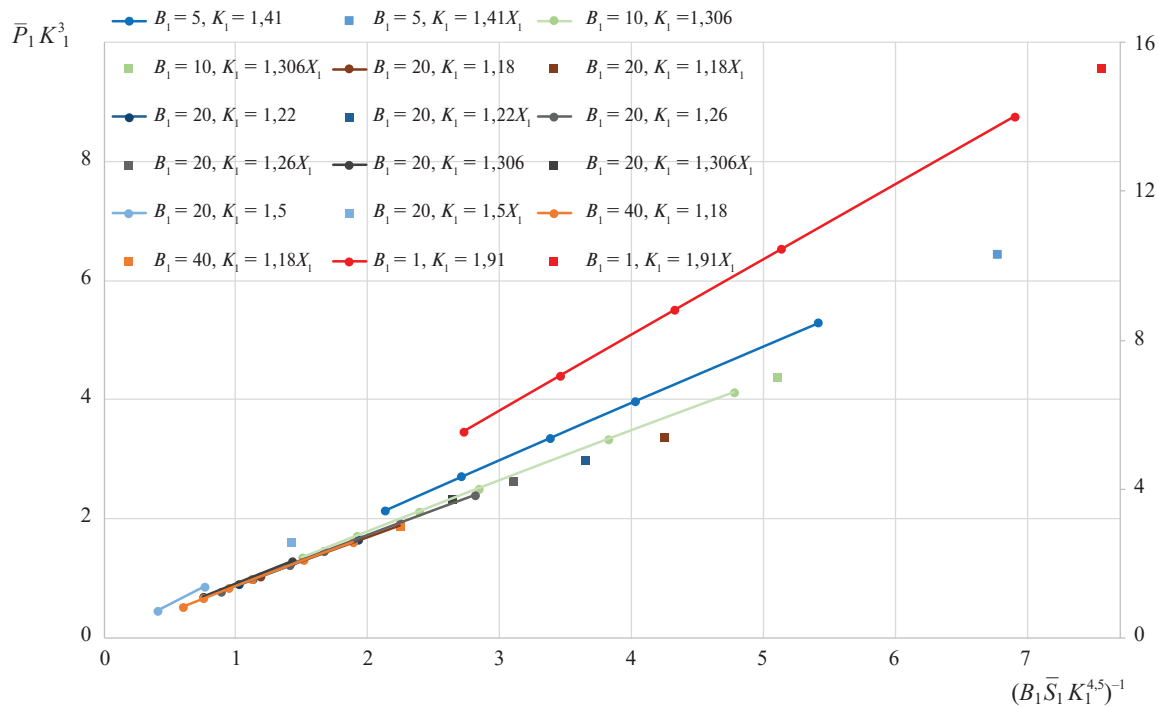


Рис. 4. Зависимость прироста давления после начала сброса от параметров $B_1 S_1$ и B

Fig. 4. Dependence between the pressure rise after the onset of discharge and parameters $B_1 S_1$ and B

водились преимущественно для случаев $B > B_1$, что равносильно условию $S_0 / X_0 \Pi > 1$, которое следует из (7) и (13). В строительной практике соотношение B/B_1 изменяется в пределах 1,2–5,0. Меньшие значения характерны для помещений небольшого объема с глубиной установки ЛСК, соответствующей глубине установки оконных блоков. Большие соотношения соответствуют промежуточным значениям с легко-сбрасываемыми конструкциями в виде облегченных панелей. На рис. 4 можно видеть место концентрации точек, которые соответствуют встречающимся в практике случаям. Абсолютное давление на первом пике для этих случаев можно описать выражением:

$$P_1 = P_{\text{вск}} K_1^3 \left(1 + \frac{95,3}{B_1 S_1 K_1^{7,5}} \right). \quad (17)$$

В месте концентрации расположены точки, соответствующие значениям $B_1 = 5$, $K_1 \leq 1,5$. В верхней части рисунка расположены данные для $B_1 = 1$, $K_1 \leq 1,91$. Уменьшение параметра K_1 до 1,49 (что соответствует $B_1 = 5$) способствует переходу точек в зону, находящуюся на линии продолжения зоны концентрации.

Исследование динамики давления при вскрытии незаглубленной легко-сбрасываемой конструкции показало, что она определяется в этом случае параметрами $\bar{S}_1$ и B_1 . Максимальное давление растет пропорционально $\bar{S}_1^{-1}$ при любом B , и оно тем больше, чем меньше B_1 при постоянном значении

$\bar{S}_1$. Последнее утверждение равносильно тому, что динамика давления на этой стадии развития взрыва определяется периметром проема, а не его площадью. Действительно, истечение происходит через боковые поверхности свободного пространства, имеющие площадь ΠX_1 . В случае заглубленных конструкций зависимость от параметров $\bar{S}_1$ и B_1 сохраняется. При этом добавляется зависимость от параметра B , который через параметр K_1 определяет давление открытия проема и скорость ЛСК при выходе из него. Результаты вычислений представлены графически и в виде интерполяционных выражений (16)–(17). Эти результаты абсолютно новые и дают возможность определять максимальное значение давления на стадии начального роста давления с учетом развития его сброса.

Выводы

Работа посвящена изучению динамики подъема давления при внутреннем дефлаграционном взрыве в помещении с момента начала взрыва и до формирования первого пика (максимума) давления. При этом учитывается влияние многих факторов: объем помещения, площадь и периметр проема, глубина установки легко-сбрасываемой конструкции в проеме, ее масса, давление вскрытия. В такой постановке задача решается впервые. В более ранних исследованиях [27] не учитывалось заглубление ЛСК и ее толщина, что приводит к занижению уровня давления. В других работах [28] рассматри-

вается динамика взрыва только до момента выхода легкобрасываемой конструкции из проема.

В представленном исследовании рассматривается динамика взрыва до момента формирования первого максимума давления с учетом стадии сброса давления после выхода ЛСК из проема.

В результате получены данные по характеру нагрузки на стадии ее нарастания в начальный момент взрыва, что важно знать для оценки величины и динамичности нагрузки. Зависимость изменения давления взрыва на этой стадии взрыва от безразмерных факторов дает возможность проектировать максимально эффективные легкобрасываемые конструкции. В работе введены два безразмерных фактора — S_1 и B_1 . До настоящего времени нагрузка на стадии нарастания давления принималась либо линейной, либо по кубическому закону в зависимости от времени [27]. В основополагающих работах [1, 2] для объемов, разгерметизирующихся в процессе взрыва, используется единственный безразмерный комплекс, который совпадает с комплексом для разгерметизиро-

ванного объема $\bar{S}_0$ (6), т.е. условия разгерметизации не учитываются. Для помещений малых объемов жилого комплекса, например для кухни, представленные результаты имеют важное значение, так как позволяют учесть быстрое развитие взрыва в малом объеме и глубину оконной рамы в проеме.

Случай $B_1 = B = 1$ (верхняя линия на рис. 4) соответствует случаю повышения избыточного давления на первом пике. Такая ситуация возможна только для малых объемов, около 10 м^3 , когда заглубление легкобрасываемой конструкции в проеме $X_0 = 0,25 \text{ м}$, а площадь проема S_0 и периметр Π дают $X_1 = S_0/\Pi = 1/4 = 0,25 \text{ м}$. Такие случаи требуют особого внимания и в дальнейшем более углубленного изучения.

После фазы нарастания давления следует фаза спада и новый подъем давления. Точное описание динамики давления в этих фазах связано с конкретной формой и размером помещения и, по-видимому, будет решаться с применением численных методов. Возможен также консервативный подход, при котором фаза спада давления не учитывается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bradly D., Mitcheson A.* The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. I // *Combustion and Flame*. 1978. Vol. 32. Pp. 221–236.
2. *Bradly D., Mitcheson A.* The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. II // *Combustion and Flame*. 1978. Vol. 32. P. 237.
3. *Moen I.O., Donato M.* Flame acceleration due to turbulent produced by obstacles // *Combustion and Flame*. 1980. Vol. 31. Pp. 21–30.
4. *Moen I.O., Donato M.* Turbulent flame propagation and acceleration in the Presents of Obstacles // *Progress in Astronomy and Aeronautics*. 1981. Vol. 75. Pp. 33–47.
5. *Eckhoff R.K., Fuhre K., Guirao C.M., Lee J.H.S.* Venting of turbulent gas explosions in a 50 м^3 chamber // *Fire safety journal*. 1984. Vol. 8. Pp. 191–197.
6. *Solberg D.M.* Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // 18-th Symposium (International) the combustion institute. 1980. Pp. 1607–1614.
7. *Van Wingerden C.J.M.* On the rade acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination // *Combustion and Flame*. 1983. Vol. 51. Pp. 109–111.
8. *Medvedev S.P., Polenov A.N., Khomik S.V., Gelfand B.E.* Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion // *Symposium (International) on Combustion*. 1994. Vol. 25. Issue 1. Pp. 73–78.
9. *Phylaktou H., Andrews G.E.* The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle // *Combustion and Flame*. 1991. Vol. 85. Issue 3–4. Pp. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
10. *Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzatz N., Greenc A.R.* Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2000. Vol. 21. Issue 1–3. Pp. 109–116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
11. *Park D.J., Green A.R., Lee Y.S., Chen Y.C.* Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement // *Combustion and Flame*. 2007. Vol. 150. Issue 1–2. Pp. 27–39. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.04.005
12. *Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G.* Using Large Eddy Simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles // *Journal of Hazardous Materials*. 30 September 2009. Vol. 169. Issue 1–3. Pp. 435–442. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.115
13. *Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G. et al.* Large Eddy Simulation and PIV measurements of unsteady premixed flames accelerated by obstacles // *Flow Turbulence Combust.* 2009. Vol. 83. Pp. 227–250. DOI: 10.1007/s10494-008-9198-3
14. *Masri A.R., AlHarbi A., Meares S., Ibrahim S.S.* A comparative study of turbulent premixed flames propagating past repeated obstacles // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51. Issue 22. Pp. 7690–7703. DOI: 10.1021/ie201928g
15. *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 Pre-*

- vention in the Process Industries. 2003. Vol. 16. Issue. 5. Pp. 395–402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4
16. 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. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.027
 17. Горев В.А., Салымова Е.Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве эффективных легко-сбрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2010. Т. 19. № 2. С. 41–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13079703>
 18. Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 1. С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21
 19. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. P. 03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
 20. Нугметов Г.М., Сошенко М.В., Шмырев В.И. Подход к оценке нагрузок на сооружение после взрыва бытового газа // *Технологии гражданской безопасности*. 2018. Т. 15. № 1 (55). С. 28–32. DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.5.28 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32721128>
 21. Gorev V. About dependence of parameters of internal explosion on the device of safety designs in apertures of the protecting walls of the production and residential buildings // VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2018). 2018. Vol. 251. P. 02015. DOI: 10.1051/mateconf/201825102015
 22. Gorev V.A. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1425. Issue 1. P. 012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
 23. Gorev V. 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. P. 042047. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042047
 24. Polandov Yu.Kh., Babankov V.A. Особенности развития газового взрыва в помещении при наличии смежной комнаты // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Т. 23. № 3. С. 68–74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.38-46
 25. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. P. 04025. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025
 26. Gorev V., Chelekova E. Assessment of structural bearing capacity in case of internal explosion // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. P. 02048. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302048
 27. Gorev V., Chelekova E. Internal explosion. Pressure peaks // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. P. 02041. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302041
 28. Горев В.А., Мольков В.В. О зависимости параметров внутреннего взрыва от устройства предохранительных конструкции 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

REFERENCES

1. Bradly D., Mitcheson A. The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. I. *Combustion and Flame*. 1978; 32:221-236.
2. Bradly D., Mitcheson A. The venting of gaseous Explosion in spherical vessels. II. *Combustion and Flame*. 1978; 32:237.
3. Moen I.O., Donato M. Flame acceleration due to turbulent produced by obstacles. *Combustion and Flame*. 1980; 31:21-30.
4. Moen I.O., Donato M. Turbulent flame propagation and acceleration in the Presents of Obstacles. *Progress in Astronomy and Aeronautics*. 1981; 75:33-47.
5. Eckhoff R.K., Fuhre K., Guirao C.M., Lee J.H. S. Venting of turbulent gas explosions in a 50 m³ chamber. *Fire Safety Journal*. 1984; 8:191-197.
6. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18-th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
7. Van Wingerden C.J.M. On the rade acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination. *Combustion and Flame*. 1983; 51:109-111.
8. Medvedev S.P., Polenov A.N., Khomik S.V., Gelfand B.E. Initiation of upstream-directed detonation induced by the venting of gaseous explosion. *Symposium (International) on Combustion*. 1994; 25(1):73-78.
9. Phylaktou H., Andrews G.E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle. *Combustion and Flame*. 1991; 85(3-4):363-379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
10. Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzate N., Greenc A.R. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. March 2000; 21(1-3):109-116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
11. Park D.J., Green A.R., Lee Y.S., Chen Y.C. Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confine-

- ment. *Combustion and Flame*. 2007; 150(1-2):27-39. DOI: 10.1016/j.combustflame.2007.04.005
12. Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G. Using Large Eddy Simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 169(1-3):435-442. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.115
 13. Di Sarli V., Di Benedetto A., Russo G. et al. Large Eddy Simulation and PIV measurements of unsteady premixed flames accelerated by obstacles. *Flow Turbulence Combust.* 2009; 83:227-250. DOI: 10.1007/s10494-008-9198-3
 14. Masri A.R., Al Harbi A., Meares S., Ibrahim S.S. A comparative study of turbulent premixed flames propagating past repeated obstacles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012; 51(22):7690-7703. DOI: 10.1021/ie201928g
 15. 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; 1(5):395-402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4
 16. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M., Markarov D.V. Vented gaseous deflagrations: modelling of hinged inertial vent covers. *Journal of Hazardous Materials*. 2004; 116(1-2):1-10. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.08.027
 17. Gorev V.A., Salymova E.Yu. Usage of sandwich-panels as effective easily jettisonable constructions by inside combustions in industrial buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(2):41-44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13079703> (rus).
 18. Polandov Yu.K., Dobrikov S.A., Kukin D.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(8):5-14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14 (rus).
 19. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
 20. Nigmatov G., Soshenko M., Shmyrev V. Approach to the assessment of structural loads following household gas explosion. *Civil Security Technology*. 2018; 15:1(55):28-32. DOI: 10.54234/CST.19968493.2018.15.1.55.5.28 (rus).
 21. Gorev V. About dependence of parameters of internal explosion on the device of safety designs in apertures of the protecting walls of the production and residential buildings. *VI International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE-2018)*. 2018; 251:02015. DOI: 10.1051/mateconf/201825102015
 22. Gorev V.A. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425(1):012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
 23. Gorev V. Actions of explosive loads of the protecting designs taking into account vibration combustion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365(4):042047. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042047
 24. Polandov Yu.Kh., Babankov V.A. Effect of location source of fire in the room on the development of gas explosion. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(3):68-74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.01.38-46 (rus).
 25. Gorev V., Salymova E. The use of sandwich-panels as a safety and easily thrown off designs for internal explosions. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04025. DOI: 10.1051/mateconf/20168604025
 26. Gorev V., Chelekova E. Assessment of structural bearing capacity in case of internal explosion. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02048. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302048
 27. Gorev V., Chelekova E. Internal explosion. Pressure peaks. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:02041. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302041
 28. Gorev V.A., Molkov V.V. On the dependence of internal explosion parameters on the installation of safety structures in the apertures of the protecting walls of industrial and residential buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(10):6-25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25 (rus).

Поступила 05.05.2022, после доработки 25.05.2022;
принята к публикации 03.06.2022

Received May 5, 2022; Received in revised form May 25, 2022;

Accepted June 3, 2022

Информация об авторах

ГОРЕВ Вячеслав Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 690901; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Information about the authors

Vyacheslav A. GOREV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690901; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru



КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, инженер испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Teacher of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Engineer of Laboratory at Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; ORCID 0000-0002-1383-574X; e-mail: KorolchenkoAD@mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

