

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 2. С. 15–22
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(2):15-22

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.83

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.02.15-22>

Влияние заглубления легкобрасываемых конструкций на формирование взрывной нагрузки

Вячеслав Александрович Горев, Евгения Юрьевна Челекова,
Антон Дмитриевич Корольченко ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение легкобрасываемых конструкций (ЛСК) для уменьшения давления при внутреннем взрыве в помещении широко распространено. Кроме того, это мероприятие узаконено нормативно. Однако нормативные документы игнорируют тот распространенный факт, что ЛСК заглублены в проеме как минимум на свою толщину. С момента начала движения ЛСК после разрушения ее крепления к корпусу до момента выхода ЛСК из проема давление взрыва может возрастикратно.

Цель. Определить влияние заглубления ЛСК в проеме на рост давления при внутреннем взрыве на начальной стадии развития взрыва при движении ЛСК внутри проема.

Методы исследования. Экспериментальное исследование проводилось во «взрывной» камере с открывающимся проемом, в котором была установлена модель ЛСК.

Результаты и их обсуждение. Выявлено, что при соблюдении герметичности объема давление взрыва растет пропорционально t^3 , по крайней мере до $\Delta P < 10$ кПа. В случае свободного движения ЛСК внутри проема герметичность системы нарушается по мере развития взрыва. В результате происходит уменьшение давления, при котором ЛСК выходит из проема, по сравнению с расчетным, в условиях герметичности. Тем не менее рост давления даже в условиях негерметичности следует изменению безразмерного параметра B , определяющего процесс на этой стадии взрыва.

Выводы. Процесс контролируется безразмерным параметром B . Количественное отличие обуславливается потерей герметичности системы при росте давления и возникновении силы трения при попытке уплотнить систему. Эти оба обстоятельства уменьшают относительный рост давления взрыва за время движения ЛСК в проеме, если силу трения включать в определение давления, при котором происходит разрушение связей ЛСК с конструкцией.

Ключевые слова: взрыв газа; аварийный взрыв; негерметичность помещения; давление вскрытия; экспериментальные исследования

Для цитирования: Горев В.А., Челекова Е.Ю., Корольченко А.Д. Влияние заглубления легкобрасываемых конструкций на формирование взрывной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 15–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.15-22

✉ Корольченко Антон Дмитриевич, e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

The effect of embedment depth of relief structures on explosive loading

Vyacheslav A. Gorev, Evgenia Yu. Chelekova, Anton D. Korolchenko ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Using relief structures to reduce pressure in case of an indoor explosion is widely spread. Moreover, it is legitimized by regulations. However, regulatory documents ignore the well-known fact that the embedment depth of relief structures is equal to or exceeds the value of their thickness. As of the moment when the relief structure begins to move after the disintegration of its bonding from the frame and up to the moment when it leaves the opening, explosion pressure may rise exponentially.

Goal. The goal is to determine the effect of embedment depth of a relief structure on the pressure rise during an indoor explosion at the initial stage of explosion development when the relief structure moves in the opening.

Research methods. The experiment was conducted in a blasting chamber with an opening door where the model of a relief structure was installed.

Results and discussion. The authors found that, if the chamber remained hermetically sealed, the explosion pressure increased proportionally to t^3 , at least, up to $\Delta P < 10$ kPa. In case of free motion of a relief structure in

the opening, the tightness of the system degraded as the explosion developed. As a result, the relief structure left the opening if the pressure value was below that identified as a result of calculations made for conditions of tightness. Nevertheless, an increase in pressure, even in case of poor tightness, followed a change in dimensionless parameter B , which determined the process at this stage of explosion development.

Conclusions. The process is controlled by dimensionless parameter B . The quantitative difference is triggered by the system tightness loss, accompanying the pressure rise, and emergence of the friction force accompanying the attempt to hermetically seal the system. These two circumstances reduce the relative explosion pressure rise, while the relief structure is in motion in the opening if the friction force is taken account of in the course of identifying the value of pressure at which bonding between the relief structure and the building are disrupted.

Keywords: gas explosion; emergency explosion; room leak; rupture pressure; experimental research

For citation: Gorev V.A., Chelekova E.Yu., Korolchenko A.D. The effect of embedment depth of relief structures on explosive loading. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):15-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.15-22 (rus).

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

Введение

Изучение действия ЛСК на формирование взрывной нагрузки при внутреннем взрыве на начальной стадии его развития происходило без учета заглубления ЛСК внутри перекрываемого проема [1–7]. Тем не менее многие инерционные ЛСК, используемые для защиты взрывоопасных строительных объектов, являются заглубленными¹ [8–12]. Однако в существующих нормативных и регламентирующих документах это обстоятельство игнорируется [13].

Заглубление ЛСК внутри проема начало исследоваться сравнительно недавно [14–16]. Основное влияние на формирование взрывной нагрузки сводилось к следующим эффектам. При сохранении герметичности объема во времени движения ЛСК внутри проема рост давления взрыва происходит в соответствии с условием герметичности. Время движения ЛСК внутри проема и рост давления на этой стадии определяется безразмерным параметром, определяемым отношением времени развития взрыва в объеме к времени смещения ЛСК на глубину установки. Из сказанного следует, что роль заглубления тем критичнее, чем меньше объем помещения и больше скорость горения и чем больше глубина установки и масса ЛСК. Более сложная зависимость наблюдается от величины давления вскрытия, т.е. от давления, при котором начинается движение ЛСК. С одной стороны, чем больше это давление, тем быстрее происходит движение ЛСК и скорее открывается пространство для сброса давления, с другой стороны, само стартовое давление больше. В результате получается, что конечное давление к моменту начала сброса давления будет всегда тем больше, чем больше давление вскрытия (начало движения при прочих одинаковых условиях [15–17]). После выхода ЛСК из проема начинается сброс давления. Движение ЛСК и его эффективность на этой стадии дополнительно опре-

деляется еще одним безразмерным параметром, так как на этой стадии движение характеризуется другим масштабом длины $X_1 = S_0/\Pi$. Это именно то расстояние, на которое должна сместиться ЛСК после выхода из проема, чтобы боковая площадь истечения газов $X_1\Pi$ сравнялась с полной площадью проема S_0 (Π — периметр проема).

В работах [16–19] приведены результаты исследований движения ЛСК на всех стадиях. Эти результаты представлены в безразмерных комплексах и тем самым дают зависимость эффективности ЛСК от ее физических параметров и условий взрыва.

Результаты работ [17–20] получены на основании аналитических и численных решений модельных уравнений, учитывающих движение ЛСК внутри проема и начало истечения газов при выходе ЛСК из проема. Скорость горения предполагалась постоянной, а форма очага сферической. Во время движения ЛСК в проеме сохранялась герметичность объема, трение между ЛСК и стенками проема не учитывалось. Экспериментальных исследований, а следовательно, и экспериментальных результатов по данному вопросу нет [20–23]. Данная работа является первой попыткой экспериментально изучить влияние глубины установки ЛСК в проеме на формирование взрывной нагрузки на начальной стадии внутреннего дефлаграционного взрыва.

Методы исследования

Экспериментальные взрывы проводились в кубической камере с рабочим объемом $V_0 = 0,125 \text{ м}^3$, с открывающимся проемом площадью $S_0 = 0,025 \text{ м}^2$ и периметром $\Pi = 0,6 \text{ м}$. Иницирование осуществлялось в геометрическом центре камеры. Одна грань камеры изготовлена из прозрачного стекла. Это позволяло измерить скорость расширения очага взрыва при помощи скоростной камеры со скоростью 1000 кадров в секунду. Датчик давления был установлен внутри камеры, ЛСК изготавливались из дерева. Внутри проема помещалась втулка, позволяющая регулировать глубину установки ЛСК. Момент

¹ Патент на полезную модель RU 220195 U1. 2023. Запорное устройство для легкосбрасываемой конструкции / А.С. Кирюхин.

начала движения ЛСК и выход его из проема фиксировались визуально с помощью фотосъемки.

Смесь готовилась напуском пропана в камеру с последующим перемешиванием вентилятором. Состав смеси после перемешивания составлял 3 % объемных. После окончания перемешивания смесь выдерживалась 3 мин. Затем происходил запуск видеосъемки и системы измерения давления и осуществлялось искровое поджигание. После взрыва камера вентилировалась в течение 5 мин.

Результаты исследований и их анализ

В первой серии опытов исследовался процесс при сохранении герметичности объема до начала движения ЛСК. Для этого начало движения ЛСК ограничивалось клеящейся лентой — скотчем, закрепляющей ЛСК снаружи по периметру проема. На рис. 1 представлены экспериментальные точки $\Delta P(t)$, часть этих данных составляет табл. 1.

Данные рис. 1 свидетельствуют, что при дефляционном взрыве с постоянной скоростью горения давление взрыва на начальной стадии пропорционально t^3 , как это показано в [14, 16]. В следующей серии экспериментов исследовалась динамика взрыва с учетом заглубления ЛСК в проеме и без страховки обеспечения герметичности с использованием скотча.

На рис. 2 представлена типичная осциллограмма $\Delta P(t)$ при взрыве с заглубленной ЛСК.

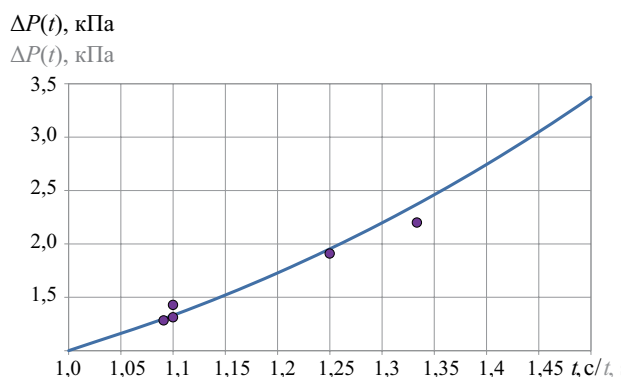


Рис. 1. График зависимости давления от времени является кубической параболой $\Delta P_2/\Delta P_1 = (t_2/t_1)^3$
Fig. 1. The pressure-time graph is a cubic parabola $\Delta P_2/\Delta P_1 = (t_2/t_1)^3$

Таблица 1. Данные опыта № 1
Table 1. Experiment 1 data

t, c t, s	0,03	0,04	0,05	0,055	0,06	0,066
$P, Па$ P, Pa	500	1100	2100	3000	3850	5050
$KW^3,$ $м^3/с^3$ $KW^3,$ $м^3/с^3$	23,15	21,5	21	22,54	22,3	22

Было проведено три серии опытов с вариацией заглубления, массы ЛСК, давления вскрытия и скорости горения.

На рис. 3 дано сравнение зависимости $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ с экспериментальными результатами из трех серий опытов.

График строится на основании зависимости $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ и экспериментальных данных из табл. 2–4.

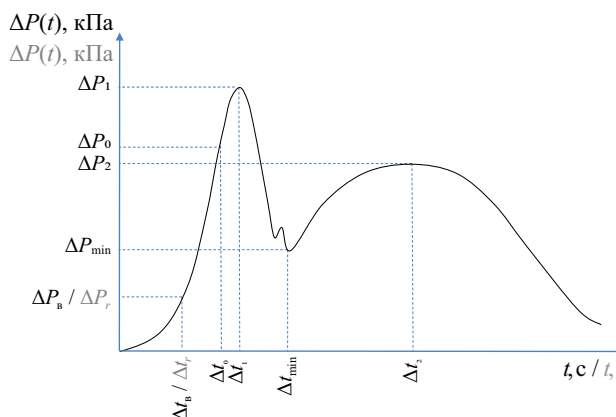


Рис. 2. Изменение давления при взрыве с учетом заглубления ЛСК: ΔP_b — давление «вскрытия», начало движения ЛСК в проеме, кПа; t_b — время начала движения ЛСК в проеме при ΔP_b , с; ΔP_o — давление «открытия», момент выхода ЛСК из проема, кПа; t_o — момент выхода ЛСК из проема при ΔP_o , с; ΔP_1 — пик давления в момент движения ЛСК при t_1 , кПа; t_{min} — время достижения P_{min} при $X_1 = S_0/\Pi$, с; t_2 — время достижения пика давления ΔP_2 при максимальной мощности взрыва, с

Fig. 2. A change in pressure during an explosion, taking into account the embedment depth of a relief structure: ΔP_r is the rupture pressure, the onset of motion of the relief structure in the opening, kPa; t_r is the time when the relief structure starts moving in the opening at ΔP_r , s; ΔP_o is the pressure when the relief structure leaves the opening, kPa; t_o is the moment when the relief structure leaves the opening at ΔP_o , s; ΔP_1 is the pressure peak at the time when the relief structure moves at t_1 , kPa; t_{min} is the time to P_{min} at $X_1 = S_0/\Pi$, s; t_2 is the time to pressure peak ΔP_2 , at maximum power of explosion, s

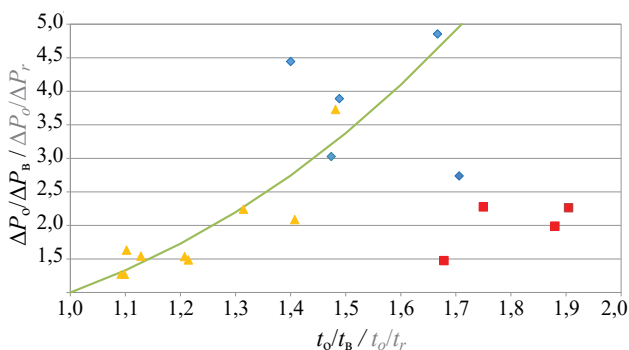


Рис. 3. Сравнение зависимости $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ с экспериментальными результатами из трех серий опытов (табл. 2–4)
Fig. 3. Comparison between dependence $\Delta P_o/\Delta P_b = (t_o/t_b)^3$ with experimental results obtained in the course of three series of experiments (Table 2–4)

Таблица 2. Экспериментальные данные при $X_0 = 0,04$ м, $m = 0,2$ кг**Table 2.** Experimental data at $X_0 = 0.04$ m, $m = 0.2$ kg

t_b / t_r	0,034	0,042	0,05	0,043	0,057
t_o	0,058	0,07	0,07	0,064	0,084
$\Delta P_b / \Delta P_r$	970	620	783	750	1202
ΔP_o	2655	3010	3480	2918	3640
KW_b^3 / KW_r^3	30,8	10,48	7,83	11,81	8,11
KW_o^3	17	10,96	12,7	13,9	7,7

Таблица 3. Экспериментальные данные при $X_0 = 0,02$ м, $m = 0,118$ кг**Table 3.** Experimental data at $X_0 = 0.02$ m, $m = 0.118$ kg

t_b / t_r	0,028	0,021	0,025	0,028
t_o	0,049	0,04	0,047	0,047
$\Delta P_b / \Delta P_r$	716	600	740	742
ΔP_o	1629	1358	1471	1094
KW_b^3 / KW_r^3	40,8	81	59,2	42,25
KW_o^3	17,3	26,5	17,7	13,12

Из рис. 3 вытекает, что общая тенденция экспериментальной зависимости $\Delta P_o / \Delta P_b = t_o / t_b$ следует за теоретической, т.е. $\Delta P_o / \Delta P_b|_o \rightarrow$ растет с ростом $t_o / t_b|_o$. Но этот рост отстает от случая герметичного объема, когда $\Delta P_o / \Delta P_b = (t_o / t_b)^3$. То есть логично сделать вывод, что при нахождении ЛСК в проеме герметичность объема нарушается в большинстве случаев. В случае взрыва в герметичном объеме теоретическая модель при давлениях $\Delta P < 20$ кПа [14, 16] дает зависимость:

$$\Delta P = KW^3 \frac{t^3}{V_0}, \quad (1)$$

где W — видимая скорость пламени, м/с;

V_0 — объем камеры, м³.

В случае сферического очага $K = 4/3 \pi \gamma (\sigma - 1) / \sigma$, $\sigma = \rho_o / \rho_b$ — степень расширения при горении.

При взрыве в герметичном объеме $W = \text{const}$, $K = \text{const}$ во время взрыва на начальной стадии следует, что $KW_o^3 = KW_b^3$.

Обработка данных экспериментов дает в большинстве случаев $KW_o^3 < KW_b^3$, что можно объяснить

потерей герметичности в процессе движения ЛСК в проеме.

При взрыве в герметичном объеме величина KW^3 сохраняется. Поэтому появляется возможность компенсировать негерметичность объема изменением величины KW_b^3 путем приравнивания ее величине KW_o^3 путем корреляции времени t_b . Выбор величины KW_o^3 в виде базовой диктуется в данном случае тем обстоятельством, что давление на первом пике ΔP_1 следует за временем открытия проема t_o и поэтому определяется в большей степени условиями во время t_o , нежели t_b . С учетом проделанной таким образом коррекции величины KW_b^3 , производится корреляция величины t_b и параметра B [16].

В дальнейших расчетах используется значение B , определенное по скорректированному времени $t_b = t_b^c$:

$$B = \frac{\Delta P_b t_b^2}{X_0 \rho_{\Pi}}. \quad (2)$$

По скорректированному значению параметра « B » определяется величина $(1 + \Theta) = t_o / t_b$ из соотношения:

$$\frac{4}{5} = \frac{1}{5} (1 + \Theta)^5 - (1 + \Theta) + 0,8. \quad (3)$$

Это соотношение учитывает движение ЛСК внутри проема при начальных условиях t_b^c — скорректированное время вскрытия, ΔP_b^3 — экспериментальное давление вскрытия.

С учетом такой коррекции рис. 3 примет вид рис. 4, который построен по результатам коррекции и экспериментальных данных (табл. 5).

Скорректированный рис. 4 уже лучше соответствует предсказаниям теоретических зависимостей, полученных в предположении герметичности объема во времени движения ЛСК в проеме. Видимо, теоретические оценки давления открытия $\Delta P_o / \Delta P_b$ дают оценку сверху для случая всех возможных негерметичных условий. В то же время ряд экспериментов показывает результаты, когда отношение $\Delta P_o / \Delta P_b$ превышает значение для герметичного объема.

Таблица 4. Экспериментальные данные при $X_0 = 0,01$ м, $m = 0,118$ кг**Table 4.** Experimental data at $X_0 = 0.01$ m, $m = 0.118$ kg

t_b / t_r	0,035	0,027	0,027	0,044	0,053	0,049	0,051	0,039	0,042
t_o	0,046	0,04	0,038	0,048	0,064	0,054	0,056	0,044	0,051
$\Delta P_b / \Delta P_r$	415	405	540	805	870	727	859	835	826
ΔP_o	930	1510	1127	1020	1336	1186	1094	1287	1227
KW_b^3 / KW_r^3	12,1	25,72	34,8	11,8	7,3	7,72	8,1	17,6	13,9
KW_o^3	11,94	29,5	25,7	11,33	6,4	9,4	7,8	18,9	11,6

Таблица 5. Результаты коррекции t_b Table 5. Corrected results t_r

t_o/t_b t_o/t_r	1,51	1,67	1,64	1,57	1,46	–	–	–	–
$\Delta P_o/\Delta P_b$ $\Delta P_o/\Delta P_r$	2,74	4,85	4,44	4	3	–	–	–	–
KW_0^3	17	10,5	12,7	13,9	7,7	–	–	–	–
t_o/t_b t_o/t_r	1,38	1,3	1,37	1,35	–	–	–	–	–
$\Delta P_o/\Delta P_b$ $\Delta P_o/\Delta P_r$	2,27	2,26	2	1,5	–	–	–	–	–
KW_0^3	17,3	26,5	17,7	13,12	–	–	–	–	–
t_o/t_b t_o/t_r	1,37	1,46	1,365	1,23	1,18	1,24	1,19	1,25	1,23
$\Delta P_o/\Delta P_b$ $\Delta P_o/\Delta P_r$	2,14	3,73	2,06	1,25	1,55	1,65	1,21	1,55	1,5
KW_0^3	12	29,5	25,7	11,33	6,4	9,4	7,8	18,9	11,6

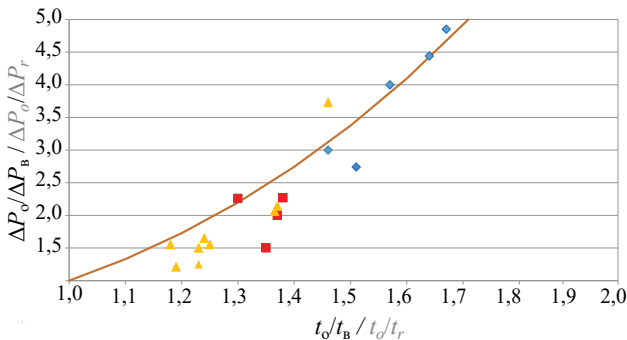


Рис. 4. Сравнение результатов коррекции и экспериментальных данных

Fig. 4. Comparison between corrected results and experimental data

Такое положение возникает в экспериментах, когда путем уплотнения пространства между ЛСК и стенками проема удавалось достичь хорошей герметичности. При этом возникала заметная сила сопротивления.

Значение параметра «В» при этом увеличивалось из-за роста ΔP_b и t_b (см. (2)), что приводило к уменьшению величины t_o/t_b , т.е. происходило смещение точки t_o/t_b в сторону более низких давлений. Такой результат получается при движении ЛСК вверх против силы тяжести [19].

Выводы

Проведено экспериментальное исследование влияния заглубления ЛСК в проеме на развитие взрыва при его начальной стадии до выхода ЛСК из проема. В результате обнаружено, что изменение давления взрыва во время движения ЛСК в проеме следует тенденции, предсказанной в ранних теоретических исследованиях [15–17]. В случае сохранения герметичности объема во времени движе-

ния ЛСК и отсутствия трения результаты хорошо совпадают. При креплении ЛСК без обеспечения герметичности происходит ее нарушение в процессе движения ЛСК внутри проема, что приводит к уменьшению давления в момент выхода ЛСК из проема. Улучшение герметичности путем уплотнения между движущейся поверхностью ЛСК и стенкой проема вызывает увеличение силы трения, что приводит также к отклонению результатов эксперимента от расчетных. Упомянутые отклонения (негерметичность и трение) невозможно предсказать, что значительно усложняет планирование и обработку экспериментов. Сила трения покоя увеличивает давление вскрытия, а следовательно, время вскрытия. В результате увеличивается параметр «В», определяющий давление ЛСК без трения (2), что в свою очередь уменьшает t_o/t_b (3), а следовательно, и отношение $\Delta P_o/\Delta P_b$ для случая герметичного объема, а тем более для случая негерметичного течения процесса на стадии движения ЛСК в проеме. При любой силе сопротивления, в том числе трения, зависимость $\Delta P_o/\Delta P_b \sim (t_o/t_b)^3$ сохраняется для случая герметичного объема.

При постоянной силе сопротивления, например, против силы тяжести и с учетом ее в определении давления вскрытия ΔP_b величина $\Delta P_o/\Delta P_b$ уменьшается в силу уменьшения отношения $(t_o/t_b)^3$.

Для случая сухого трения сила сопротивления изменяется в процессе движения ЛСК в отличие от случая движения против силы тяжести, и эти изменения в условиях практического применения ЛСК непредсказуемы. Влияние изменения силы трения на процесс открытия проема не имеет смысла для практических нужд и выходит за рамки насто-

ящих исследований. Однако на основании проведенных экспериментальных исследований можно утверждать:

1. Изменение давления взрыва во время движения ЛСК в проеме следует тенденциям, предсказанным в [14–16].

2. Отклонение (уменьшение) давления во время начала открытия проема объясняется потерей герметичности объема во время движения ЛСК внутри проема.

3. При уплотнении контакта «ЛСК – стена проема» возникает сила трения, которая также искажает картину.

4. Скорректированные результаты опытов с потерей герметичности, но без трения, хорошо согласуются с результатами [14–16].

5. С точки зрения практики важно отметить, что теоретические результаты работ [14–16] по определению давления открытия можно считать оценкой сверху для отношения $\Delta P_o / \Delta P_v$, если в давлении вскрытия ΔP_v учитывать силу сопротивления (трение).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций // Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». М. : Пожарная безопасность и наука, 2000. 224 с.
2. Горев В.А., Салымова Е.Ю. Использование сэндвич-панелей в качестве эффективных легкобрасываемых конструкций при внутренних взрывах в промышленных зданиях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and explosion safety. 2010. Т. 19. № 2. С. 41–44.
3. 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. Issue 5. Pp. 395–402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4
4. Molkov V., Grigorash A., Eber R., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations with inertial vent covers: State-of-the-art and progress // Process Safety Progress. 2004. Vol. 23. Issue 1. Pp. 29–36. DOI: 10.1002/prs.10002
5. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях : учеб. пособие. М. : Изд-во АСВ, 2007. 152 с.
6. Bradly D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions // Molkov V.V. (ed.). Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997. Pp. 51–59.
7. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // 18th Symposium (International) the combustion institute. 1980. Pp. 1607–1614.
8. Томин С.В. Взрыв теперь можно посчитать! // Ройтмановские чтения : сб. мат. XI науч.-практ. конф. г. Москва, 21 марта 2023 г. / под ред. Д.А. Самошина. М., 2023. С. 91–94.
9. Волчецкая Е.А., Дунаев А.А., Жамойдик С.М., Зинкевич Г.Н., Иваницкий А.Г. Экспериментальные исследования по определению давления вскрытия и изменения угла поворота вращаемых легкобрасываемых конструкций при дефлаграционном взрыве топливовоздушной смеси // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7. № 1. С. 43–53. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.43
10. Бунто О.В., Жамойдик С.М. Экспериментальные исследования прочностных и деформационных свойств полимерных материалов, рассматриваемых в качестве светопрозрачного заполнения легкобрасываемых конструкций // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2023. Т. 7. № 1. С. 32–42. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.32
11. Кирина А.С. Легкобрасываемые конструкции // Тенденции развития современной науки : сб. тр. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2023. С. 457–461.
12. Потапов Д.А. Об опасности взрывов газа в замкнутых строительных объемах // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2023. № 2. С. 213–218.
13. Максакова А.В. Исследование нормативной документации на тему легкобрасываемой конструкции и предложение по его изменению // Молодежные инновации : сб. мат. семинара молодых ученых в рамках XXIII Междунар. науч. конф. М., 2020. С. 144–147.
14. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings // International Scientific Conference Environmental Science for Construction Industry – ESCI 2018. 2018. Vol. 193. P. 03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
15. 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
16. 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

17. Chen D., Wu C., Li J., Liao K. A numerical study of gas explosion with progressive venting in a utility tunnel // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. No. 162. Pp. 1124–1138. DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.009
18. Chmielewski R., Bqk A. Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. P. 102815. DOI: 10.1016/j.job.2021.102815
19. Горев В.А., Челекова Е.Ю., Лецев Н.В. Об эффективности легкобрасываемых конструкций, расположенных в покрытии // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 5. С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-7-14
20. 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
21. Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г. Определение площади вышибных конструкций в зданиях взрывоопасных производств // *Промышленное строительство*. 1969. № 6. С. 19–22.
22. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 460 с.
23. Громов Н.В. Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газо-паровоздушных смесей : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2007. 134 с.

REFERENCES

1. Pilyugin L.P. *Forecasting the consequences of internal emergency explosions*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2010; 380. (rus).
2. Gorev V.A., Salymova E.Yu. Usage of sandwich-panels as effective easily jettisonable constructions by inside combustions in individual buildings. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(2):41-44. (rus).
3. 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; 16(5):395-402. DOI: 10.1016/S0950-4230(03)00066-4
4. Molkov V., Grigorash A., Eber R., Tamanini F., Dobashi R. Vented gaseous deflagrations with inertial vent covers: State-of-the-art and progress. *Process Safety Progress*. 2004; 23(1):29-36. DOI: 10.1002/prs.10002
5. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. *Design of buildings and structures under emergency explosive impacts : textbook*. Moscow, Izd-vo ASV, 2007; 152. (rus).
6. Bradly D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions. Molkov V.V. (ed.). *Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997; 51-59.
7. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18-th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
8. Tomin S.V. The explosion can now be counted! *Romanov readings : Collection of materials of the XI scientific and practical conference*. Moscow, March 21, 2023. D.A. Samoshin (ed.). Moscow, 2023; 91-94. (rus).
9. Volchetskaya E.A., Dunaev A.A., Zhamoydik S.M., Zinkevich G.N., Ivanitskiy A.G. Experimental studies to determine the opening pressure and the change of rotation angle of rotatable easy-to-reset structures during a deflagration explosion of an air-fuel mixture. *Journal of Civil Protection*. 2023; 7(1):43-53. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.43
10. Bunto O.V., Zhamoydik S.M. Experimental investigations of strength and deformation properties of polymeric materials considered as a translucent filling of easy-to-reset structures. *Journal of Civil Protection*. 2023; 7(1):32-42. DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.32
11. Kirina A.S. Easily throwable structures. An article in the proceedings of the conference. *Trends in the development of modern science : Proceedings of the scientific and practical conference of students and postgraduates of Lipetsk State Technical University*. Lipetsk, 2023; 457-461. (rus).
12. Potashev D.A. About the danger of gas explosions in closed construction volumes. *Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*. 2023; 2(213-218). (rus).
13. Maksakova A.V. A study of regulatory documentation on the topic of an easily removable structure and a proposal to change it. *In the collection: Youth innovations : collection of materials of the seminar of young scientists within the framework of the XXIII International Scientific Conference*. Moscow. 2020; 144-147. (rus).
14. Gorev V. Ensuring explosion safety of residential buildings. *International Scientific Conference Environmental Science for Construction Industry – ESCI 2018*. 2018; 193:03046. DOI: 10.1051/mateconf/201819303046
15. 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. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(10):6-25. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.10.6-25 (rus).
16. Gorev V.A., Korolchenko A.D. The effect of venting structures on overpressure caused by an indoor explosion. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):12-23. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.12-23 (rus).

17. Chen D., Wu C., Li J., Liao K. A numerical study of gas explosion with progressive venting in a utility tunnel. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 162:1124-1138. DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.009
18. Chmielewski R., Bąk A. Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43:102815. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102815
19. Gorev V.A., Chelekova E.Yu., Leshchev N.V. On the efficiency of blast relief panels located in the cover. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 5:7-14. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-7-14 (rus).
20. Polandov Yu.K., Korolchenko D.A., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).
21. Strel'chuk N.A., Orlov G.G. Determination of the area of blast structures in buildings of explosive industries. *Pro-myshlennoe stroitel'stvo*. 1969; 6:19-22. (rus).
22. Komarov A.A. *Forecasting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2001; 460. (rus).
23. Gromov N.V. *Improvement of the technical system for ensuring explosion resistance of buildings during explosions of gas-steam-air mixtures : dissertation for the degree of candidate of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2007; 134. (rus).

Поступила 19.02.2024, после доработки 07.03.2024;

принята к публикации 15.03.2024

Received February 19, 2024; Received in revised form March 7, 2024;

Accepted March 15, 2024

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; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

ЧЕЛЕКОВА Евгения Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 694334; Scopus AuthorID: 57201185099; ResearcherID: AAD-7630-2022; ORCID: 0000-0002-5921-9088; e-mail: kiara_lion@mail.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690901; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: kafedrapb@yandex.ru

Evgenia Yu. CHELEKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 694334; Scopus AuthorID: 57201185099; ResearcherID: AAD-7630-2022; ORCID: 0000-0002-5921-9088; e-mail: kiara_lion@mail.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Head of Testing Sector of Explosion Safety Research Center, Institute of Integrated Safety in Construction, Lecturer of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E32952017; ORCID: 000000021383574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbsmgsu.ru

Contribution of the authors: the authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.