

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 6. С. 69–78
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(6):69-78

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.83

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.06.69-78>

Особенности разрушаемых элементов предохранительных конструкций, используемых для минимизации последствий взрывных аварий в помещениях

Антон Дмитриевич Корольченко ✉, Николай Викторович Громов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность настоящей публикации обусловлена тем, что при разработке конструктивных решений предохранительных запорных устройств (ПЗУ) проектировщики часто используют элементы и материалы, которые принципиально не применимы для этих целей. Проанализированы особенности предохранительных конструкций (ПК) и легкосбрасываемых конструкций (ЛСК), используемых в зданиях и помещениях, где возможен внутренний аварийный взрыв. Приведены результаты экспериментальных исследований по тестированию работоспособности реальных конструкций.

Цель. Определение возможности применения ПК и ЛСК на взрывоопасных объектах, а также ограничений на их крепежные элементы и используемые материалы.

Материалы и методы. Исследования ЛСК, фиксируемых ПЗУ, проводились путем их испытаний на воздействие внутреннего аварийного взрыва и на сопротивление механической и ветровой нагрузкам (по ГОСТ 26602.5). Взрывные испытания проводились в кубической камере с использованием пропановоздушной смеси стехиометрического состава. Взрывное давление фиксировалось датчиками избыточного давления. Видеосъемка процесса взрыва производилась скоростными камерами.

Результаты. Проанализированы особенности предохранительных конструкций, используемых для снижения давления, возникающего при внутренних аварийных взрывах. По результатам испытаний построены и проанализированы осциллограммы взрывного давления. Показано, что использование при тестировании ПК на работоспособность статических (ветровых или механических) нагрузок взамен взрывных может привести к существенному искажению результатов тестирования. Экспериментально установлено, что тестирование образцов предохранительных конструкций на их работоспособность следует проводить только путем моделирования взрывной нагрузки.

Выводы. Замена при испытании ПК взрывных нагрузок на статические может привести к их несрабатыванию при аварийном взрыве в реальных условиях, что может повлечь за собой обрушение строительных конструкций и человеческие жертвы. Таким образом, тестирование образцов предохранительных конструкций на их работоспособность следует проводить только путем моделирования взрывной нагрузки.

Ключевые слова: аварийный взрыв; взрывные нагрузки; легкосбрасываемые конструкции; предохранительные запорные устройства; взрывозащита

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность руководителю научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» ИКБС НИУ МГСУ Александру Андреевичу Комарову за помощь при проведении анализа результатов экспериментов.

Для цитирования: Корольченко А.Д., Громов Н.В. Особенности разрушаемых элементов предохранительных конструкций, используемых для минимизации последствий взрывных аварий в помещениях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 69–78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.69-78

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

Destructible elements of safety structures used to minimize the consequences of explosive accidents in premises

Anton D. Korolchenko ✉, Nikolai V. Gromov

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the present publication is caused by the fact that during the development of constructive decisions of safety locking devices (SLD) designers often use elements and materials, which are

fundamentally not applicable for these purposes. The peculiarities of safety structures (SS) and light removable structures (LRS) used in buildings and premises where internal emergency explosion is possible are analyzed. The results of experimental studies on testing the performance of real structures are given.

Objective. Determination of the possibility of SS and LRS application at explosive objects, as well as restrictions on their fastening elements and used materials.

Materials and methods. Studies of LRS fixed by SLD were carried out by means of their tests on the impact of internal emergency explosion and on resistance to mechanical and wind loads (according to GOST 26602.5). Explosion tests were carried out in a cubic chamber using a propane-air mixture of stoichiometric composition. Overpressure sensors recorded explosive pressure. Video recording of the explosion process was done by speed cameras.

Results. The features of safety structures used to reduce the pressure generated by internal accidental explosions were analyzed. Explosive pressure oscillograms were constructed and analyzed based on the test results. It is shown that the use of static (wind or mechanical) loads instead of explosive loads in SS performance testing can lead to significant distortion of test results. It is experimentally established that testing of specimens of safety structures for their serviceability should be carried out only by modelling of explosive load.

Conclusions. Substitution of explosive loads for static loads during SS testing may lead to their failure in case of emergency explosion in real conditions, which may result in collapse of building structures and human casualties. Thus, testing of specimens of safety structures for their operability should be carried out only by modelling of explosive load.

Keywords: emergency explosion; explosive loads; light removable structures; safety locking devices; explosion protection

Acknowledgements. The authors of the article express their gratitude to the head of the Research Centre "Explosion Safety" of the Institute of Integrated Safety in Construction of the Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGUSU) Komarov Alexander Andreevich for the help in the analysis of the experimental results.

For citation: Korolchenko A.D., Gromov N.V. Destructible elements of safety structures used to minimize the consequences of explosive accidents in premises. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):69-78. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.69-78 (rus).

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

Введение

Актуальность настоящей публикации обусловлена тем, что при разработке конструктивных концепций предохранительных устройств, перекрывающих сбросные (как правило, оконные) проемы, проектировщики часто используют элементы и материалы, которые принципиально не применимы для этих целей. Это связано с тем, что основная функция предохранительных конструкций (ПК) заключается в том, что они должны достаточно быстро вскрыться или разрушиться под действием избыточного давления, создаваемого внутренним аварийным взрывом. Процесс развития взрыва скоротечен, и избыточное давление, создаваемое взрывом, носит явно выраженный нестационарный характер. Длительность взрыва в зависимости от размеров помещения и взрывоопасного облака составляет не более 1 с при градиентах избыточного давления 10–200 кПа/с [1–4]. Это обстоятельство не учитывается большинством проектировщиков, которые имеют дело в основном со стационарными процессами и поэтому не обладают необходимым опытом проектирования устройств, работающих в нестационарных условиях. Кроме этого, особенности предохранительных конструкций определяются областью их применения. Так, реализация основной функции ПК может потребоваться только в условиях аварийного взрыва, вероятность которого достаточно мала. Следовательно, предохранительные конструкции должны сохранять работоспособность

на протяжении всего срока их службы. При этом велика вероятность, что их основная функция (срабатывание) так и не будет востребована, поскольку аварийного взрыва может и не быть.

Перечисленные особенности предохранительных конструкций накладывают определенные ограничения на их крепежные элементы и используемые материалы. Описанию этих особенностей и посвящена настоящая публикация.

Материалы и методы

Прежде всего рассмотрим результаты экспериментальных исследований процесса вскрытия предохранительных конструкций в виде легко-сбрасываемых конструкций (ЛСК), фиксируемых предохранительными запорными устройствами (ПЗУ). Механические испытания десяти образцов ПЗУ 2032А показали, что среднее арифметическое усилие разрушения ПЗУ составляет 197,82 Н.

В испытаниях использовали оконный блок, фиксируемый четырьмя ПЗУ, с размерами 1550 × 1250 мм. Результаты испытаний на ветровое воздействие показали, что разрушение ПЗУ происходит при однократном воздействии перепада давления 320 Па. Это несколько меньше, чем усилие разрушения, которое было получено в ходе механических испытаний и должно составлять около $4 \cdot 197,82 \text{ Н} / (1,55 \cdot 1,25 \text{ м}^2) = 408 \text{ Па}$. Еще большее усилие, необходимое для вскрытия ЛСК (разрушения ПЗУ), потребовалось при проведении взрывных испытаний, т.е. испытаний, полностью



Рис. 1. Общий вид взрывной камеры
Fig. 1. General view of the blasting chamber

соответствующих реальным условиям эксплуатации ЛСК. При проведении серии из трех взрывных испытаний установлено, что давления вскрытия ЛСК составляли 600, 630 и 710 Па, что в 1,5 раза больше давления, полученного путем механических испытаний ПЗУ, и почти в 2 раза больше давления, полученного при однократном воздействии перепада давления при ветровых испытаниях [5–7].

Взрывные испытания проводились в кубической камере с внутренним объемом 10 м³, общий

вид которой представлен на рис. 1. При взрывных испытаниях использовалась пропановоздушная смесь стехиометрического состава. Сбросной проем площадью 1600 × 1300 мм закрывался испытуемой ЛСК. Смесь зажигалась искрой от источника, находящегося в центре камеры. Взрывное давление фиксировалось двумя датчиками с частотой опроса аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 1000 Гц (1000 опросов в секунду). Видеосъемка процесса взрыва осуществлялась скоростной камерой со скоростью протяжки 1000 кадров в секунду (или с интервалом 1,0 мс между кадрами). Цель эксперимента заключалась в определении давления вскрытия ЛСК. Было проведено три опыта. Моменты вскрытия ЛСК представлены на рис. 2.

Для пояснения методики определения давления вскрытия ЛСК рассмотрим результаты одного из проведенных опытов.

На рис. 3 приведена осциллограмма взрывного давления в камере, полученного в эксперименте 1. За нулевой момент времени принят момент зажигания смеси от искры.

При вскрытии ЛСК площадь сбросного проема увеличивается, и в определенный момент времени темп сброса давления через проем начинает преобладать над темпом нарастания давления, создаваемого взрывом [8–11]. Этому моменту соответствует перегиб на осциллограмме давления, т.е. производная взрывного давления, проходя через экстремум, начинает уменьшаться. Точку перегиба можно определить путем анализа осциллограммы давления. Для этой процедуры был выбран определенный участок осциллограммы взрывного давле-

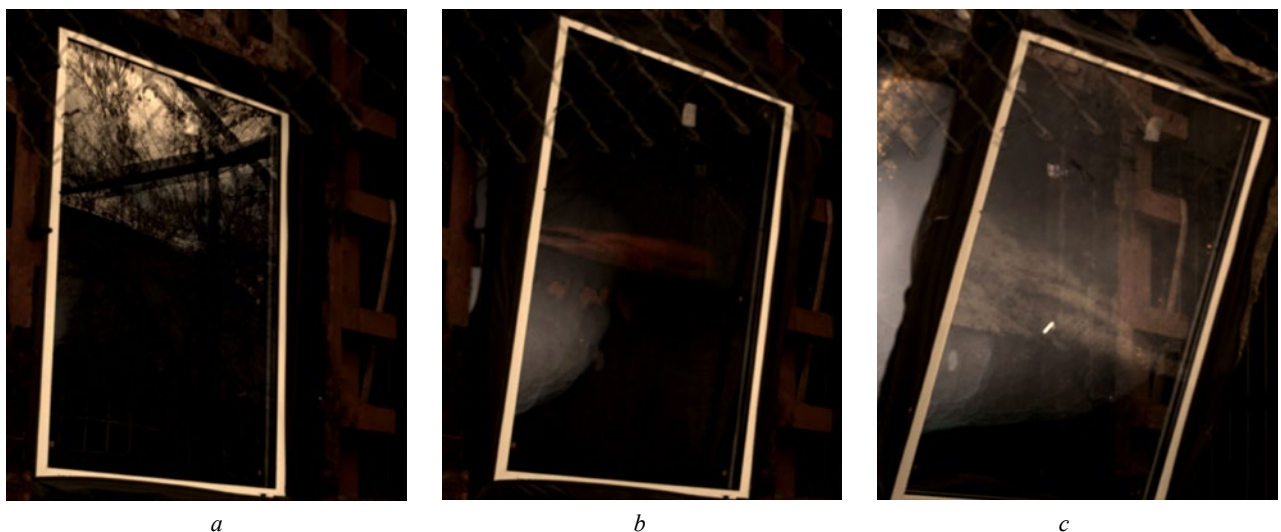


Рис. 2. Моменты процесса вскрытия ЛСК, зафиксированные скоростной камерой со скоростью протяжки 1000 кадров в секунду:
a — исходное состояние ЛСК; *b* — выброс ЛСК из проема; *c* — начало сброса продуктов взрыва из камеры в атмосферу
Fig. 2. Moments of the process of opening the LRS, recorded by a high-speed camera with a transmission speed of 1,000 frames per second: *a* — initial state of the LRS; *b* — release of LRS from the opening; *c* — beginning of the discharge of explosion products from the chamber into the atmosphere

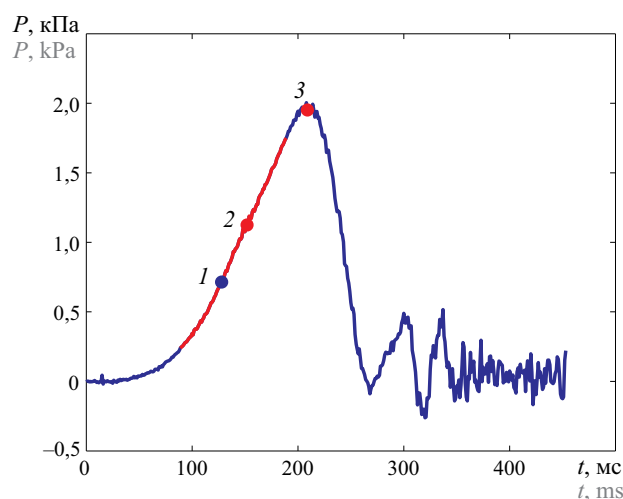


Рис. 3. Осциллограмма взрывного давления в испытательной камере (эксперимент 1): 1 — 128 мс, 0,71 кПа; 2 — 152 мс, 1,13 кПа; 3 — 209 мс, 1,95 кПа

Fig. 3. Oscillogram of the explosive pressure in the test chamber (Experiment 1): 1 — 128 ms, 0.71 kPa; 2 — 152 ms, 1.13 kPa; 3 — 209 ms, 1.95 kPa

ния (между точками, соответствующими моментам 89 и 189 мс), который выделен на рис. 3 красным цветом.

На рис. 4 приведены результаты обработки указанного участка осциллограммы. В точке, соответствующей моменту времени $t = 152$ мс, производная имеет максимум, который означает превышение темпа сброса давления через вскрывающийся сбросной проем над темпом нарастания давления вследствие взрывного горения.

Из рис. 4, *b* следует, что в момент $t = 152$ мс градиент взрывного давления достигает значительной

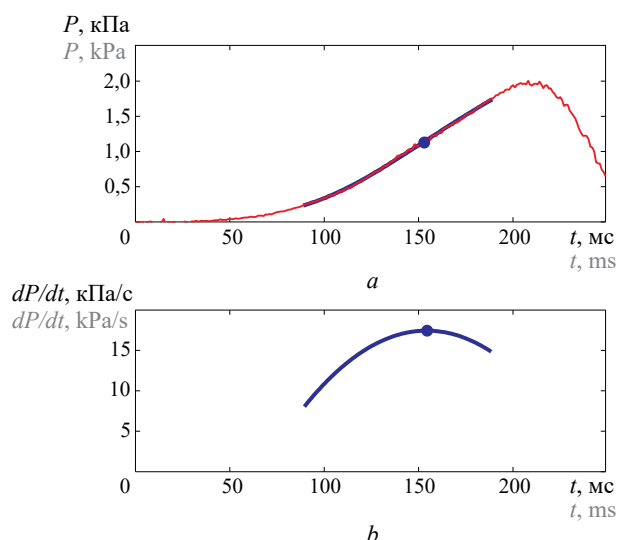


Рис. 4. Результаты обработки осциллограммы взрывного давления в испытательной камере (эксперимент 1): *a* — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; *b* — его производная

Fig. 4. Results of processing the explosion pressure oscillogram in the test chamber (Experiment 1): *a* — a fragment of the processed oscillogram; *b* — its derivative

величины — 17,5 кПа/с. Этому моменту времени соответствует взрывное давление 1,13 кПа (см. рис. 4, *a*).

Расчеты показали, что видимая скорость пламени на момент вскрытия ЛСК составляет около 2 м/с. Зная видимую скорость пламени, можно определить площадь вскрытого проема на момент перегиба в зависимости давления от времени, который отмечен точкой на рис. 4. Тогда по параметрам ЛСК можно определить смещение конструкции под действием силы давления. В данном эксперименте авторами было получено, что в момент времени 154 мс ЛСК сместилась на 11,3 мм.

Расчет кинематики ЛСК (в обратном по времени направлении) показывает, что начало ее движения (вскрытия) должно было произойти на 128-й мс. В этот момент давление в камере составляло 0,71 кПа. Из расчетов следует, что если смещение (отрыв) ЛСК происходит на 128-й мс, то к моменту 154 мс ее скорость будет равняться 0,93 м/с, а смещение составит 11,7 мм, что примерно соответствует полученному ранее значению смещения ЛСК на 11,3 мм.

В итоге было получено, что в первом эксперименте давление, при котором произошло вскрытие ЛСК, составило 0,71 кПа, а вскрытие ЛСК произошло на 128-й мс.

В двух других опытах давления вскрытия ЛСК были равны 0,60 и 0,63 кПа, что также значительно больше по сравнению с данными, полученными при ветровых и механических испытаниях.

Указанные расхождения, полученные при динамических (взрывных) и статических (ветровых и механических) испытаниях, связаны с тем, что разрушающее действие динамических нагрузок может значительно отличаться от статических. Применительно к ПЗУ это относится в основном к типу материала, из которого изготовлено ПЗУ. Например, при использовании в изделии хрупких материалов его разрушение под воздействием динамической нагрузки происходит при давлении, превышающем критическое давление на разрыв, а под воздействием статической нагрузки его разрушение определяется критическим давлением на изгиб.

Наиболее наглядно данное явление можно продемонстрировать на примере разрушения стекла при воздействии на него динамической (взрывной) и статической нагрузок.

Напомним распространенное соотношение для определения избыточного давления, при котором происходит вскрытие стекол [12–17]:

$$P_{\text{вскр}} = 3k\varphi, \quad (1)$$

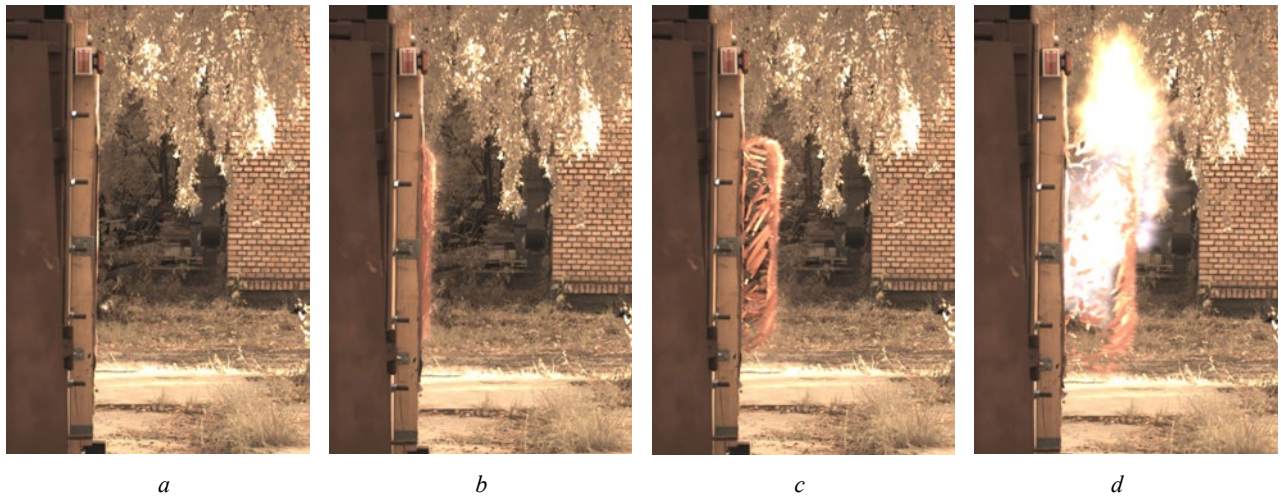


Рис. 5. Моменты процесса вскрытия остекления при внутреннем взрыве: *a* — 208 мс, 9,95 кПа; *b* — 212 мс, 10,64 кПа; *c* — 216 мс, 11,32 кПа; *d* — 220 мс, 11,80 кПа

Fig. 5. The process of opening the glazing during an internal explosion: *a* — 208 ms, 9.95 kPa; *b* — 212 ms, 10.64 kPa; *c* — 216 ms, 11.32 kPa; *d* — 220 ms, 11.80 kPa

где k — коэффициент, учитывающий поправку на площадь и толщину стекла;

ϕ — коэффициент, учитывающий форму стекла.

Коэффициенты k и ϕ определяются по соответствующим таблицам и графикам. Например, для стекла толщиной 4 мм и площадью 1 м² получаем, что давление вскрытия $P_{\text{вскр}} = 3 \cdot 0,55 \cdot 1,15 = 1,90$ кПа.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение процесса вскрытия остекления при воздействии на него взрывного давления, реализуемого при авариях.

Экспериментальные исследования проводились в кубической камере с линейным внутренним размером 2 м. Размеры единственного сбросного проема, расположенного на одной из граней кубической камеры, составляли 1,080 × 1,080 м. Сбросной проем перекрывался обычным одинарным стеклом толщиной 4 мм и размером 1 × 1 м. Стекло вставлялось в проем и крепилось на штапики с резиновыми уплотнителями. Измерение взрывного давления осуществлялось двумя датчиками измерения избыточного давления APZ 3420 с частотой выборки сигнала 5000 Гц (интервал времени между отсчетами давления — 0,2 мс). Фиксация процессов взрыва и вскрытия стекла осуществлялась видеосъемкой с помощью высокоскоростной камеры Evercam F 1000-4-C со скоростью 500 кадров в секунду и второй скоростной камеры — со скоростью 236 кадров в секунду (с интервалом 4,23 мс между кадрами). В качестве горючего использовался пропан. Смесь стехиометрического состава, которой полностью заполняли камеру, воспламенялась искрой от источника, расположенного в центре камеры. Процесс регистра-

ции сигнала с датчиков давления и процесс кино съемки были полностью синхронизированы.

На рис. 5 приведены четыре снимка моментов взрыва пропановоздушной смеси в камере, в результате которого произошло вскрытие одинарного остекления, перекрывающего сбросной проем.

На рис. 6 представлена осциллограмма взрывного давления, полученная в ходе эксперимента. Полезный сигнал при помощи цифровой фильтрации был очищен от высокочастотных шумов (выше 100 Гц). Точки 1–4 на рис. 6 соответствуют моментам процесса вскрытия на рис. 5.

Анализ рис. 5 и результатов расчетов, описывающих колебательный процесс полотна стекла,

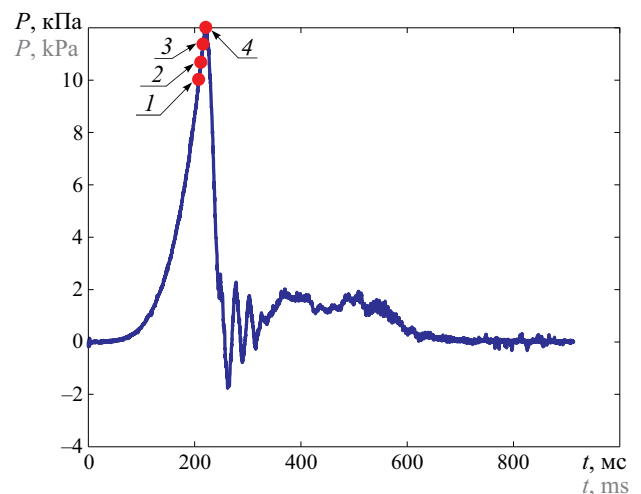


Рис. 6. Осциллограмма взрывного давления: 1–4 соответствуют кадрам на рис. 5; 1 — 208 мс, 9,95 кПа; 2 — 212 мс, 10,64 кПа; 3 — 216 мс, 11,32 кПа; 4 — 220 мс, 11,80 кПа

Fig. 6. Oscillogram of explosive pressure: 1–4 correspond to frames in Fig. 5; 1 — 208 ms, 9.95 kPa; 2 — 212 ms, 10.64 kPa; 3 — 216 ms, 11.32 kPa; 4 — 220 ms, 11.80 kPa

позволяет описать картину вскрытия стекла под воздействием на него динамической нагрузки от взрыва следующим образом.

При достижении избыточным давлением значения 2 кПа, что примерно соответствует давлению вскрытия стекла, полученному расчетом по формуле (1), в стекле возникают значительные изгибные напряжения. При статическом нагружении полотна стекла и таком давлении происходит сначала локальное, а потом и его полное разрушение [18–20].

При динамическом нагружении стекла возникает колебательный процесс с увеличивающейся амплитудой вынужденных колебаний. Этот процесс продолжается примерно до момента времени 208 мс (давление 9,95 кПа) (см. рис. 5, *a*). На нем видно, что стекло сохранило свою целостность, хотя многократные колебания и возникающие при этом внутренние изгибные напряжения привели к многочисленным внутренним изломам. На 212-й мс (давление 10,64 кПа) изгибные колебания панели и возникающие при этом изгибные напряжения приводят к полному растрескиванию полотна стекла, что отражено на рис. 5, *b*. Дальнейший рост давления и прогиб стекла приводят к превышению внутренних напряжений, работающих на растяжение, над критическими напряжениями на растяжение. В этот момент происходит отрыв центральной, полностью растрескавшейся части стекла от границ крепления стекла (см. рис. 5, *c*). Завершающая стадия вскрытия стекла представлена на рис. 5, *d*. В этот момент площадь вскрытого проема обеспечивает достаточный сброс давления, что приводит к формированию максимума взрывного давления.

При выбросе газовой среды из проема при вскрытии ЛКС мелкие осколки выбитого стекла (см. рис. 5, *d*) разлетаются на расстояние около 25 м. Картонная мишень, расположенная в 15 м от сброс-

ного проема, достаточно сильно была повреждена осколками стекла.

Анализ фотоматериалов и экспериментальных осциллограмм взрывного давления показал, что вскрытие стекла произошло на 214-й мс при давлении внутри камеры 10,98 кПа, что в 5,5 раз превышает давление вскрытия стекла при стационарном типе его нагружения. Как указывалось ранее, при стационарном характере нагружения стекла принимаются во внимание и рассматриваются изгибные напряжения, возникающие в стекле, которые при динамическом нагружении играют второстепенную роль [21–23].

Завершая обзор конструктивных особенностей ПК, необходимо напомнить, что параметры их вскрытия являются не эксплуатационными характеристиками конструкции, а аварийными.

Для примера рассмотрим результаты тестирования предохранительной конструкции фонарного типа, в качестве ПЗУ использовались магниты.

Исследование параметров ПК проводилось в кубической камере с внутренним размером грани 2 м. ПК тестировалась на предмет ее вскрытия при взрывном горении пропановоздушной смеси стехиометрического состава. Сбросной проем размером $1,8 \times 1,8$ м был оборудован фонарем с двумя распашными створками. Масса каждой створки составляла 26,4 кг. Роль ПЗУ выполняли шесть магнитов, удерживающих вес 8 кгс (или 78,45 Н), которые были закреплены на поворотной стойке для лучшего прилегания к запорной пластине. Взрывное давление фиксировалось двумя датчиками. Фиксация процесса взрыва осуществлялась двумя скоростными камерами. Одна из них была расположена сбоку и фиксировала смещение створок со скоростью 500 кадров в секунду (или с интервалом 2 мс между кадрами). Вторая камера была расположена чуть выше створок и вела съемку



a



b

Рис. 7. Снимки с первой (*a*) и второй (*b*) кинокамер в момент реализации максимального взрывного давления (эксперимент 4)
Fig. 7. Photos from the first (*a*) and second (*b*) movie cameras at the moment of maximum explosive pressure (Experiment 4)

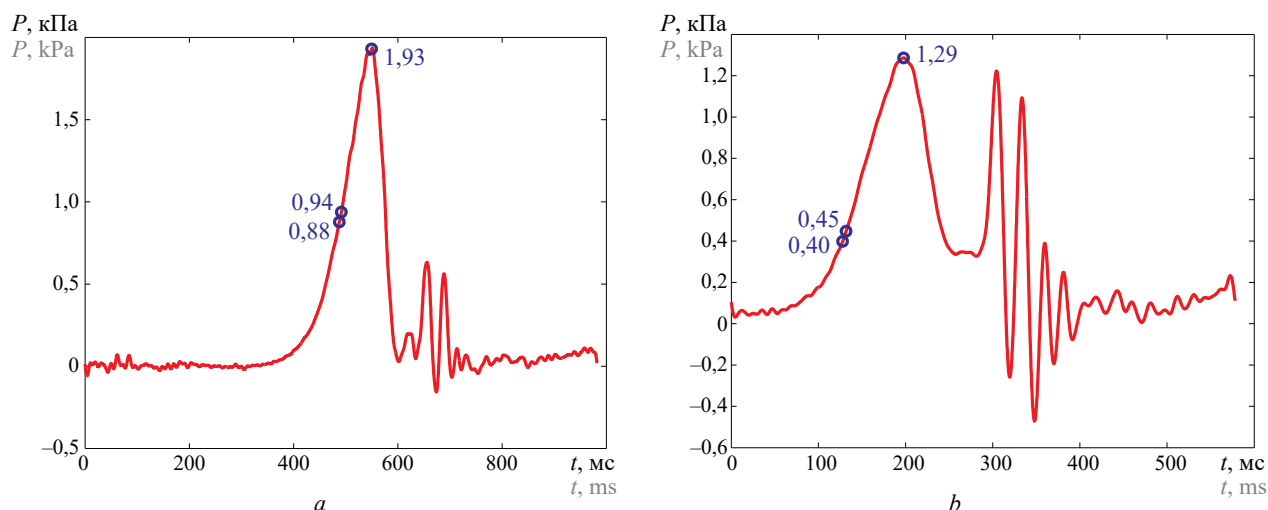


Рис. 8. Осциллограммы взрывного давления в испытательной камере в экспериментах 4 (а) и 2 (б)

Fig. 8. Oscillograms of explosive pressure in the test chamber in experiments 4 (a) и 2 (b)

со скоростью протяжки 117 кадров в секунду (или с интервалом 8,54 мс между кадрами).

Было испытано два фонаря. С каждым из них было проведено по два эксперимента: 1 и 2 — с первым фонарем, 3 и 4 — со вторым. Рассмотрим результаты экспериментов 2 и 4.

Снимки с первой и второй видеокамер в момент реализации максимального взрывного давления в испытательной камере при проведении эксперимента 4 представлены на рис. 7.

На рис. 8 приведены осциллограммы взрывного давления в экспериментах 4 и 2, очищенные от высокочастотных составляющих (выше 100 Гц). Точками отмечены: максимальное взрывное давление в экспериментах 4 и 2 (соответственно, 1,93 и 1,29 кПа) и диапазон зафиксированного на основании киносъемки давления вскрытия створок фонаря (соответственно, 0,88–0,94 и 0,40–0,45 кПа).

В итоге было получено, что давление вскрытия створок фонаря в эксперименте 4 составило 0,88–0,94 кПа, а в эксперименте 2 — 0,40–0,45 кПа.

Значительное различие в параметрах давления вскрытия, полученных на разных образцах фонарей, обусловлено тем, что магнитные запоры зачастую неплотно прилегают к приемным планкам

и поэтому не всегда надежно фиксируют створки. Кроме этого, влияние времени на состояние магнитов в данной ситуации выглядит достаточно проблематично. Поэтому правомерность использования такого или подобного типа запорных устройств в противовзрывных ПК вызывает сильное сомнение.

Выводы

Проанализированы особенности предохранительных конструкций, используемых для снижения давления, возникающего при внутренних аварийных взрывах. Экспериментально показано, что тестирование образцов предохранительных конструкций на их работоспособность следует проводить только путем моделирования взрывной нагрузки. Использование в этих испытаниях статических или квазистатических нагрузок взамен взрывных может привести к существенному искажению (в ряде случаев в несколько раз) результатов тестирования. Итогом может стать несрабатывание прошедших тесты ПК при аварийном взрыве в реальных условиях, что может повлечь за собой обрушение строительных конструкций и человеческие жертвы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пилугин Л.П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М. : Стройиздат, 1988. 314 с.
2. 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.
3. Bradley D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions // Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations / Molkov V.V. (ed.). М. : All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997. Pp. 51–59.
4. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // 18th Symposium (International) the combustion institute. 1980. Pp. 1607–1614.

5. *Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M.* Vented gaseous deflagrations: Modelling of springloaded inertial vent covers // *Fire Safety Journal*. 2005. Vol. 40. Issue 4. Pp. 307–319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.01.004
6. *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. Vol. 162. Pp. 1124–1138. DOI: 10.1016/j.psep.2022.05.009
7. *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
8. *Zhan Li, Li Chen, Qin Fang, Wensu Chen, Hong Hao, Rong Zhu, Kang Zheng.* Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions // *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 129. Pp. 66–79. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.02.013
9. *Chengjun Yue, Li Chen, Zhan Li, Yuanchao Mao, Xiaohu Yao.* Experimental study on gas explosions of methane-air mixtures in a full-scale residence building // *Fuel*. 2023. Vol. 353. P. 129166. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129166
10. *Jialin Li, Xuebiao Wang, Jin Guo, Jiaqing Zhang, Su Zhang.* Effect of concentration and ignition position on vented methane-air explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 68. P. 104334. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104334
11. *Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В.* Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. № 31 (6). С. 78–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90
12. *Максакова А.В.* Исследование нормативной документации на тему легкосбрасываемой конструкции и предложение по его изменению // *Молодежные инновации : сб. мат. сем. молодых ученых в рамках XXIII Междунар. научн. конф. М., 2020. С. 144–147.*
13. *Gorev V.A.* Scale model operation of formation of pressure at internal explosion // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1425. P. 012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
14. *Пилугин Л.П.* Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Пожнаука, 2000. 224 с.
15. *Шлег А.М.* Определение параметров легкосбрасываемых конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2002. 201 с.
16. *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
17. *Корольченко О.Н., Корольченко А.Д.* Определение давления вскрытия легкосбрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. Вып. 7. С. 914–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921
18. *Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г.* Определение площади вышибных конструкций в зданиях взрывоопасных производств // *Промышленное строительство*. 1969. № 6. С. 19–22.
19. *Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A.* On ignition of combustible material in a gas explosion in the premise // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 052056. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052056
20. *Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A.* Dynamic effects at internal deflagration explosions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 603. P. 052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008
21. *Комаров А.А., Корольченко Д.А., Фан Т.А.* Особенности определения коэффициента динамичности при импульсных нагрузках // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. № 27 (2–3). С. 37–43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43
22. *Polandov Iu., Korolchenko D.* The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 106. Art. 01040. DOI: 10.1051/matecconf/201710601040
23. *Громов Н.В.* Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газопаровоздушных смесей : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2007. 134 с.

REFERENCES

1. *Pilyugin L.P.* *Constructions of explosive production facilities*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 314. (rus).
2. *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).

3. Bradly D. Evolution of flame propagation in large diameter explosions. *Proceedings of 2nd International Seminar on Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations*. Molkov V.V. (ed.). Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997; 51-59.
4. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
5. Molkov V.V., Grigorash A.V., Eber R.M. Vented gaseous deflagrations: Modelling of springloaded inertial vent covers. *Fire Safety Journal*. 2005; 40(4):307-319. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.01.004
6. 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
7. 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.job.2021.102815
8. Zhan Li, Li Chen, Qin Fang, Wensu Chen, Hong Hao, Rong Zhu, Kang Zheng. Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2019; 129:66-79. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.02.013
9. Chengjun Yue, Li Chen, Zhan Li, Yuanchao Mao, Xiaohu Yao. Experimental study on gas explosions of methane-air mixtures in a full-scale residence building. *Fuel*. 2023; 353:129166. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129166
10. Jialin Li, Xuebiao Wang, Jin Guo, Jiaqing Zhang, Su Zhang. Effect of concentration and ignition position on vented methane-air explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68:104334. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104334
11. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Gromov N.V. Experimental determination of glazing efficiency in case of indoor explosions caused by accidents. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):78-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-9 (rus).
12. Maksakova A.V. Study of regulatory documentation on the topic of easily resettable structures and proposals for changing it. *Youth Innovations : collection of materials from the seminar of young scientists within the framework of the XXIII International Scientific Conference*. Moscow, 2020; 144-147. (rus).
13. Gorev V.A. Scale model operation of formation of pressure at internal explosion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425:012177. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012177
14. Pilyugin L.P. *Maintenance explosion proof buildings with relief designs*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000; 224. (rus).
15. Shleg A.M. *Determination of the parameters of easily dropped structures : Dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2002; 201. (rus).
16. 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).
17. Korolchenko O.N., Korolchenko A.D. Determining the burst pressure of vent structures with account taken of wind loads. *Vestnik MGSU*. 2022; 17(7):914-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921 (rus).
18. Strel'chuk N.A., Orlov G.G. Determination of the area of ejection structures in explosive production buildings. *Industrial Engineering*. 1969; 19-22. (rus).
19. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. On ignition of combustible material in a gas explosion in the premise. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052056. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052056
20. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. Dynamic Effects at Internal Deflagration Explosions. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2019; 603(5):052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008
21. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Phan T.A. Features of determination of the dynamic amplification factor under impulse loads. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):37-43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43 (rus).
22. Polandov Iu., Korolchenko D. The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106(01040):8. DOI: 10.1051/mateconf/201710601040
23. Gromov N.V. *Improving the technical system for ensuring the 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 11.09.2023, после доработки 23.10.2023;

принята к публикации 15.11.2023

Received September 11, 2023; Received in revised form October 23, 2023;

Accepted November 15, 2023

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, соискатель на уч. ст. канд. техн. наук, 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

ГРОМОВ Николай Викторович, канд. техн. наук, заместитель директора Института комплексной безопасности в строительстве, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N.Gromov@ikbs-mgsu.ru

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

Information about the authors

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 Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Nikolay V. GROMOV, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Senior Lecturer of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N.Gromov@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.