

Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий

Александр Андреевич Комаров , Дмитрий Александрович Корольченко,
Николай Викторович Громов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты испытаний одинарного и двойного остекления, используемого в качестве легкосбрасываемых конструкций (ЛСК) для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений при внутренних аварийных взрывах. Критерием сравнительной эффективности ЛСК является значение максимального давления внутри помещения, реализуемого вследствие аварийного дефлаграционного взрыва и срабатывания легкосбрасываемой конструкции. Чем ниже максимальное давление при прочих равных условиях (объем помещения, площадь сбросного проема, вид взрывоопасной смеси), тем выше эффективность ЛСК.

Цель и задачи. Целью настоящего исследования является экспериментальное определение эффективности остекления, используемого в качестве легкосбрасываемых конструкций, при аварийных дефлаграционных взрывах внутри зданий.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- экспериментально определить давление вскрытия ЛСК в виде одинарного и двойного остекления при внутреннем дефлаграционном взрыве;
- определить максимальное давление внутри взрывной камеры при использовании ЛСК в виде остекления;
- провести сравнительный (в том числе численный) анализ результатов экспериментальных исследований для подтверждения точности определения давления вскрытия ЛСК;
- сравнить результаты экспериментальных исследований с расчетными значениями давления вскрытия ЛСК, полученными с помощью методик, рекомендуемых нормативными документами.

Методы исследования. При проведении испытаний ЛСК была использована взрывная камера с рабочим объемом 8 м³ и площадью сбросного проема 1,3 м². Таким образом, удельная площадь ЛСК составляла 0,16 м² на 1 м³, что в 3,2 раза больше рекомендуемой нормативными документами. Поэтому превышение максимального давления внутри взрывной камеры свыше пороговых значений (5–7 кПа) однозначно указывает на неэффективность работы ЛСК.

Результаты и их обсуждение. Результаты испытаний одинарного остекления толщиной 4 мм и площадью 1 м² (соответствует требованиям п. 6.2.30 СП 56.13330.2021) показали, что такое остекление неэффективно в качестве ЛСК. Избыточное давление вскрытия и максимальное давление в помещении даже при избыточной необходимой площади сбросного проема имеет высокие значения: $P_{вск} = 11$ кПа, $P_{max} = 12$ кПа. Такие нагрузки являются разрушающими для промышленных зданий и сооружений.

Высокие значения давления вскрытия (14,7 и 17,7 кПа) и максимального давления в камере (17,7 и 20,5 кПа) позволяют сделать вывод о неэффективности работы также и двойного остекления в качестве ЛСК.

При испытаниях как одинарного, так и двойного остекления наблюдался значительный разлет осколков (до 30 м в глубину и до 13 м в ширину), что в случае аварии может привести к поражению людей, находящихся рядом со зданием в момент аварии.

Выводы. Эксперименты показали, что предполагаемые (расчетные) давления вскрытия остекления, рекомендуемые рядом нормативных документов и научных публикаций, могут значительно отличаться от реальных значений, что может послужить причиной обрушений зданий при аварийных внутренних взрывах.

Ключевые слова: дефлаграция; легкосбрасываемая конструкция; сбросной проем; взрывные нагрузки; давление вскрытия

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект #FSWG-2020-0007).

Для цитирования: Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В. Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 6. С. 78–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90

 Комаров Александр Андреевич, e-mail: KomarovAA@mgstu.ru

Experimental determination of glazing efficiency in case of indoor explosions caused by accidents

Alexander A. Komarov ✉, Dmitriy A. Korolchenko,
Nikolay V. Gromov

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

ABSTRACT

Introduction. The authors present the results of testing single and double glazing, used as explosion relief structures (ERS) to ensure the explosion resistance of buildings and structures in case of indoor explosions caused by accidents. The criterion of comparative effectiveness of ERS is the value of maximum pressure inside the premises caused by an emergency deflagration explosion and the response of an explosion relief structure. The lower the maximum pressure under otherwise equal conditions (the volume of the room, the area of the relief opening, the type of the explosive mixture), the higher the ERS effectiveness.

Goal and objectives. The purpose of this study is to experimentally determine the effectiveness of glazing used as an explosion relief structure in case of emergency deflagration explosions inside buildings.

It is necessary to solve the following tasks to attain the pre-set goal:

- experimentally determine the relief pressure of ERS, or single and double glazing during an indoor deflagration explosion;
- determine the maximum pressure inside the explosion chamber using glazing as ERS;
- conduct the comparative (also numerical) analysis of the results of experimental studies to confirm the accuracy of the ERS relief pressure value;
- compare the results of experimental studies with the calculated values of the ERS relief pressure obtained using the methods recommended in the regulatory documents.

Research methods. In the course of ERS testing, an explosion chamber, having the operating volume of 8 m³ and the relief opening area of 1.3 m² was used. Hence, the specific area of the ERS was 0.16 m² per 1 m³, which is 3.2 times higher than that recommended in the regulatory documents. Therefore, any pressure, exceeding the threshold values (5–7 kPa) inside the explosion chamber, unambiguously shows the ERS inefficiency.

Results and their discussion. The results of testing the 4 mm single glazing and the area of 1 m² (meeting the requirements of paragraph 6.2.30 of SP (Construction Regulations) 56.13330.2021) show that such glazing is ineffective as the ERS. Excessive relief pressure and maximum pressure in a room with an extra area of the relief opening have high values: $P_{rel} = 11$ kPa; $P_{max} = 12$ kPa. Such loadings are destructive for industrial buildings and structures.

High values of relief and maximum pressures (14.7 and 17.7 kPa) in a chamber (17.7 and 20.5 kPa) allow drawing a conclusion about the inefficiency of double glazing as ERS.

In the course of testing both single and double glazing, considerable glass fragment dispersion (up to 30 m deep and up to 13 m wide) was observed, which could result in the injury of people near the building during an accident.

Conclusions. Experiments have shown that the assumed (calculated) glazing deflagration pressures, recommended by a number of regulatory documents and research publications, may differ significantly from the actual values, which may cause building collapses as a result of indoor explosions.

Keywords: deflagration; easily discharged structures; relief opening; explosive loading; relief pressure

This work was supported by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation (project #FSWG-2020-0007).

For citation: Komarov A.A., Korolchenko D.A., Gromov N.V. Experimental determination of glazing efficiency in case of indoor explosions caused by accidents. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):78-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90

✉ Alexander Andreevich Komarov, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Введение

подавляющее большинство проектировщиков и специалистов, эксплуатирующих взрывоопасные производства, считают, что остекленные оконные проемы будут гарантированно освобождены от стекла при возможном аварийном взрыве [1–3]. Эта уверенность основывается на повседневном опыте, который говорит о хрупкости стекла и подтверждается статическими испытаниями, определяющими параметры вскрытия (разрушения)

стекла при воздействии на него нагрузки. Результаты экспериментальных исследований, приведенных в настоящей статье, говорят о том, что вскрытие стекла при воздействии на него динамической нагрузки со значительным градиентом давления, что характерно для аварийных взрывов, может происходить при значительно более высоких уровнях давления, чем принято считать в настоящее время [4–9]. Данное обстоятельство позволяет говорить о влиянии сценария развития взрывной аварии на способность остекленных предохранительных

конструкций (остекленных окон) выполнять функцию сбросного проема.

Прежде всего необходимо напомнить распространенные соотношения, описывающие процесс вскрытия сбросного проема (освобождения проема от остекления). Принято считать, что коэффициент вскрытия (освобождения) оконного проема от стекла, характеризуемый отношением площади образовавшегося в застекленном проеме отверстия $F_{пр}$ к площади незастекленного проема $S_{пр}$, зависит от величины избыточного давления в здании P и от избыточного давления, при котором происходит начальное разрушение стекол $P_{вск}$. По данным, приведенным, например, в источнике [1, 10, 11], коэффициент вскрытия (освобождения) оконного проема от стекла Φ равен:

$$\Phi \left(\frac{P}{P_{вск}} \right) = \frac{F_{пр}}{S_{пр}} = 1 - \exp \left[-0,12 \cdot \left(\frac{P}{P_{вск}} - 1 \right)^{2,5} \right], \quad (1)$$

где $P_{вск}$ — избыточное давление, при котором происходит вскрытие стекол, которое зависит от размера единичной ячейки (a и b) и толщины стекла:

$$P_{вск} = 3k\phi, \quad (2)$$

k — коэффициент, учитывающий поправку на площадь (F) и толщину стекла (H);

ϕ — коэффициент, учитывающий форму стекла.

Коэффициенты k и ϕ определяются по соответствующим таблицам и рисункам (см., например, [1]). Так, для стекла толщиной $H = 4$ мм и площадью $F = 1$ м² получаем, что давление вскрытия составляет $P_{вск} = 3 \cdot 0,55 \cdot 1,15 = 1,90$ кПа.

Целью данной работы является экспериментальное определение эффективности остекления, используемого в качестве легкосбрасываемых конструкций, при аварийных дефлаграционных взрывах внутри зданий.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- экспериментально определить давление вскрытия ЛСК в виде одинарного и двойного остекления при внутреннем дефлаграционном взрыве;
- определить максимальное давление внутри взрывной камеры при использовании ЛСК в виде остекления;
- провести сравнительный (в том числе численный) анализ результатов экспериментальных исследований для подтверждения точности определения давления вскрытия ЛСК;
- сравнить результаты экспериментальных исследований с расчетными значениями давления вскрытия ЛСК, полученными с помощью рас-

четных методик, рекомендуемых нормативными документами.

Методы исследования

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. Площадь единственного сбросного проема, расположенного на одной из граней кубической камеры, составляла 1080×1080 мм. Сбросной проем перекрывался одинарным обычным стеклом с толщиной 4 мм. Размеры полотна составляли 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, частота выборки сигнала с датчиков давления составляла 5000 Гц (интервал времени между отсчетами давления составлял 0,2 мс). Фиксация процесса взрыва и процесса вскрытия стекла осуществлялась высокоскоростной камерой Evercam F 1000-4-C, которая позволяла проводить видеосъемку со скоростью 500 кадров в секунду. В качестве горючего использовался пропан. Смесь стехиометрического состава, которой полностью заполняли камеру, воспламенялась искрой, расположенной в центре камеры. Процесс регистрации сигнала с датчиков давления и процесс киносъемки были полностью синхронизированы.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 — фотография исходного состояния камеры с установленным в сбросном проеме одинарным стеклом и фотография момента взрыва пропановоздушной смеси в камере. Фотография, приведенная на рис. 1, б, соответствует 350 мс после воспламенения смеси. Перед фронтом пламени, выброшенным из сбросного проема, находятся осколки выбитого стекла. Разлет осколков составлял около 25 м. Картонная мишень, расположенная напротив сбросного проема, была достаточно сильно повреждена осколками стекла.

На рис. 2 приведена осциллограмма взрывного давления, полученная в ходе эксперимента. Полезный сигнал при помощи цифровой фильтрации был очищен от высокочастотных шумов (выше 100 Гц).

Анализ узкополосного спектра взрывного давления показал, что основная волновая энергия концентрируется на низких частотах (ниже 100 Гц). Поэтому, собственно, само взрывное давление плохо воспринимается человеком, который регистри-

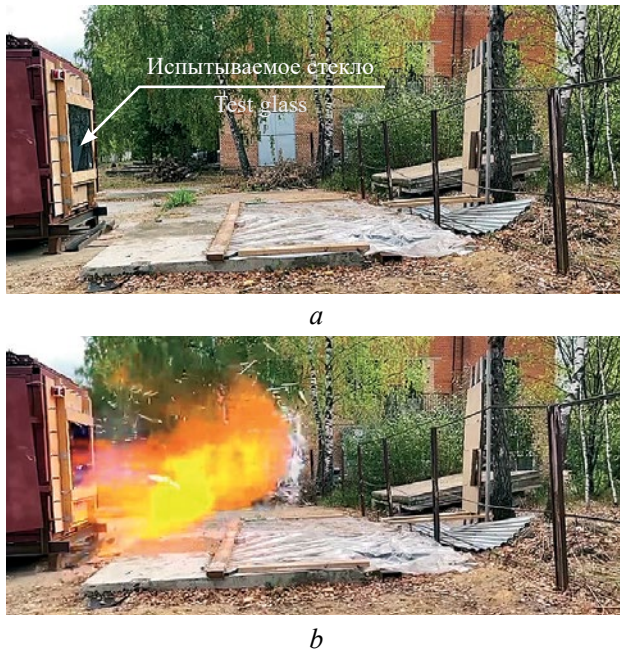


Рис. 1. Начальное состояние испытательной камеры (а) и процесс взрыва (б)
Fig. 1. Initial condition of the testing chamber (a) and the explosion (b)

рует звуковые колебания, начиная только с 20 Гц и выше.

Анализ спектрального состава взрывного давления показал, что интенсивность звуковой волны (в частотном диапазоне от 22,5 Гц и выше) составила 154,2 дБ. Интенсивность волны в инфразвуко-

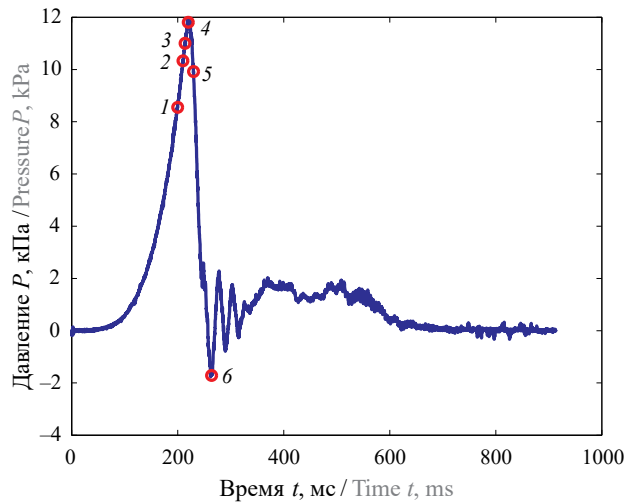


Рис. 2. Взрывное давление, очищенное от высокочастотных составляющих (более 100 Гц). Время: 1 — 200 мс; 2 — 210 мс; 3 — 214 мс; 4 — 220 мс; 5 — 230 мс; 6 — 264 мс. Давление: 1 — 8,59 кПа; 2 — 10,29 кПа; 3 — 10,98 кПа; 4 — 11,80 кПа; 5 — 9,83 кПа; 6 — -1,62 кПа

Fig. 2. Explosive pressure and time. Time: 1 — 200 ms; 2 — 210 ms; 3 — 214 ms; 4 — 220 ms; 5 — 230 ms; 6 — 264 ms. Pressure: 1 — 8.59 kPa; 2 — 10.29 kPa; 3 — 10.98 kPa; 4 — 11.80 kPa; 5 — 9.83 kPa; 6 — -1.62 kPa

вом диапазоне составила 169,1 дБ, а общая интенсивность взрывной волны составила 170,5 дБ.

На рис. 3 приведены фотографии нескольких моментов процесса вскрытия остекления. Первая фотография (рис. 3) соответствует 210 мс, давление взрыва составляло 10,29 кПа; вторая фотография

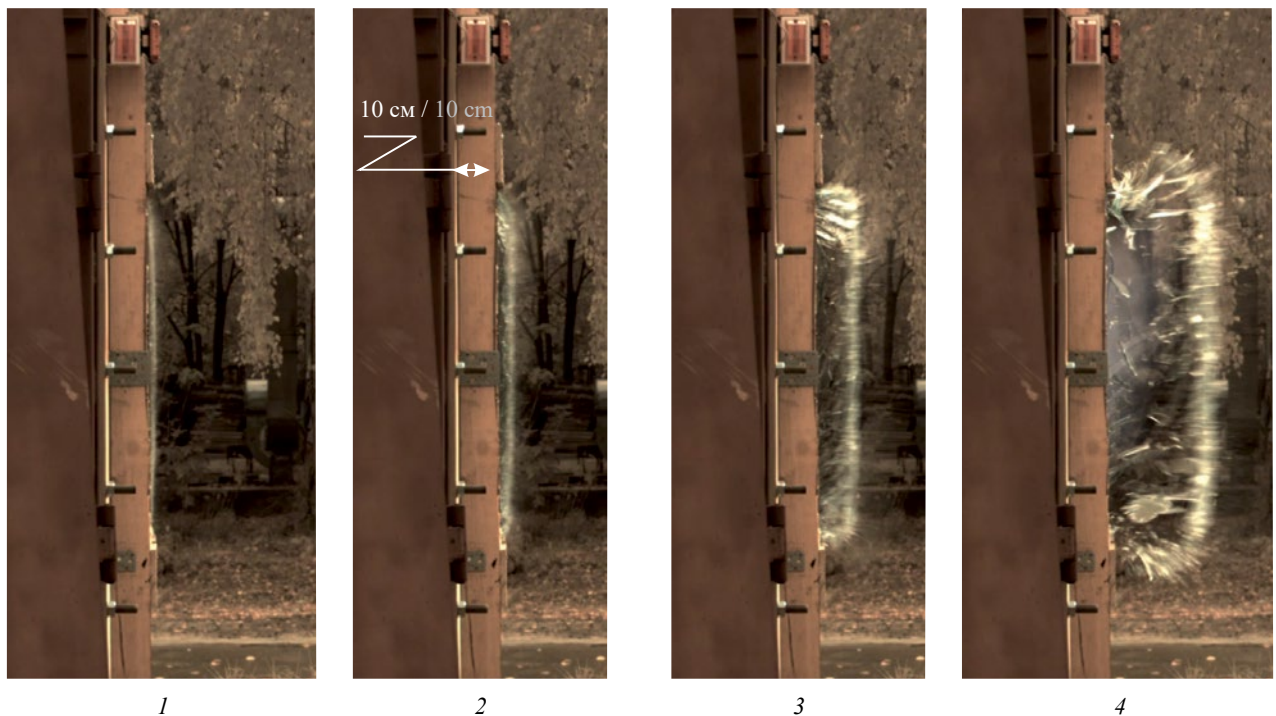


Рис. 3. Различные моменты процесса вскрытия остекления под воздействием взрывного давления: 1 — 210 мс (10,29 кПа); 2 — 214 мс (10,98 кПа); 3 — 220 мс (11,80 кПа); 4 — 230 мс (9,83 кПа)

Fig. 3. The glazing relief process under the influence of explosive pressure: 1 — 210 ms (10.29 kPa); 2 — 214 ms (10.98 kPa); 3 — 220 ms (11.80 kPa); 4 — 230 ms (9.83 kPa)

соответствует 214 мс (давление взрыва 10,98 кПа); третья фотография соответствует 220 мс (давление взрыва 11,80 кПа); четвертая фотография — 230 мс (давление взрыва 9,83 кПа). Моменты времени, соответствующие фотографиям, приведенным на рис. 3, отмечены на осциллограмме рис. 2 точками (2, 3, 4, 5).

Анализ экспериментального материала позволяет говорить о том, что вскрытие одинарного остекления произошло при давлениях, имеющих порядок величины около 10 кПа, а не 2 кПа, как это было получено нами ранее при использовании формулы (2), являющейся достаточно распространенной формулой для определения давления вскрытия стекла при воздействии на него взрывной нагрузки.

Например, из первой фотографии рис. 3, соответствующей 210 мс взрыва и давлению 10,29 кПа, следует, что при данном давлении стекло только-только начинает прогибаться, а всего через 4 мс после этого момента прогиб стекла на краях полотна становится критическим (вторая фотография рис. 3) и происходит разрушение остекления. Еще через 6 мс (третья фотография рис. 3) реализуется максимальное давление, что указывает на факт вскрытия достаточной площади сбросного проема или освобождения достаточной площади сбросного проема от стекла. После этого слой разрушенного стекла выносится газовым потоком, истекающим из сбросного проема (четвертая фотография рис. 3). Движение слоя разрушенного стекла перед газовым потоком хорошо иллюстрирует фотография, приведенная на рис. 1, б.

Именно так происходит вскрытие остекления при аварийных взрывах, имеющих значительные градиенты взрывного давления.

Таким образом, анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное движение стекла становится заметным только на 233 кадре, который соответствует 200 мс и взрывному давлению 8,59 кПа, начальный прогиб стекла фиксируется на 210 мс взрыва при давлении 10,29 кПа, а его разрушение (вскрытие) по краям полотна происходит на 214 мс при давлении 10,98 кПа.

Учитывая значительный градиент взрывного давления, что следует из приведенной на рис. 2 осциллограммы давления взрыва, необходимо провести более тщательный и детальный анализ процесса вскрытия остекления. С этой целью проанализируем полученную в ходе эксперимента осциллограмму взрывного давления.

Предварительно необходимо коротко описать методику определения параметров вскрытия сбросного проема по экспериментальным данным, описывающим взрывное давление, или, говоря другими словами, при помощи численного анализа достаточно подробной (интервал опроса датчиков давле-

ния составлял 0,2 мс) осциллограммы взрывного давления [12–15].

Фронт пламени на начальных этапах развития дефлаграционного взрыва в кубической камере и при центральном воспламенении смеси имеет сферическую форму [16–18]. Например, на рис. 4 приведена фотография фронта пламени в кубическом объеме, имеющем аналогичные с используемой нами камерой линейные размеры, и при центральном воспламенении пропановоздушной смеси стехиометрического состава.

Поэтому рост давления на начальных этапах развития взрыва в замкнутом объеме может быть определен по следующему соотношению [2, 19–22]:

$$\frac{dP}{dt} = \gamma \frac{4\pi(U \cdot t)^2 U \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{V} P_0 = \gamma \frac{4\pi R^2 U \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{V} P_0, \quad (3)$$

где P — избыточное давление взрыва;

γ — показатель адиабаты воздуха ($\gamma = 1,4$);

U — видимая скорость пламени;

ε — степень расширения продуктов взрыва;

V — объем камеры;

R — радиус сферического фронта пламени;

P_0 — атмосферное давление ($P_0 = 101,3$ кПа).

Для замкнутого объема временная зависимость внутреннего давления на начальном этапе взрыва может быть определена по следующему соотношению, которое является интегралом соотношения (3):

$$P = \gamma \frac{4\pi(U \cdot t)^3 \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{3V} P_0 = \gamma \frac{4\pi R^3 \frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}}{3V} P_0, \quad (4)$$

где R — радиус сферического фронта пламени.

Следовательно, темп роста давления определяется, следуя (3), радиусом фронта пламени и видимой скоростью пламени, а взрывное давление, следуя (4), определяется текущим значением

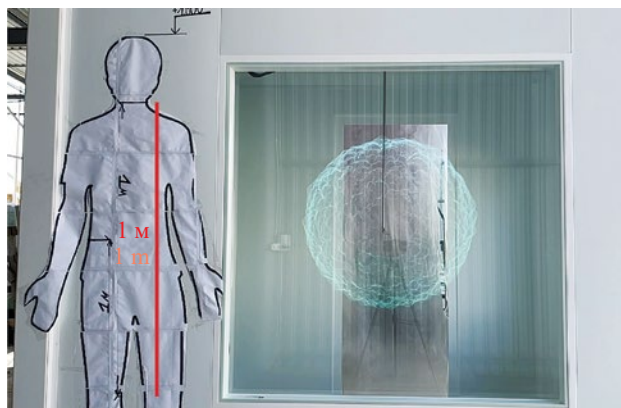


Рис. 4. Взрыв пропановоздушной смеси при центральном ее воспламенении в кубическом объеме

Fig. 4. Propane-air mixture explosion during ignition in the centre of the cubic volume

(радиусом) фронта пламени. Поэтому видимую скорость пламени на начальных этапах развития взрыва можно определить, располагая подробной временной зависимостью взрывного давления.

Проанализируем указанным способом осциллограмму взрывного давления, которая приведена на рис. 5.

При вскрытии остекления площадь сбросного проема увеличивается и в определенный момент времени темп сброса давления через проем начинает преобладать над темпом нарастания давления, создаваемого взрывом. В этом случае происходит перегиб в осциллограмме давления, т.е. производная взрывного давления, проходя через экстремум, начинает уменьшаться. Точку перегиба можно определить, анализируя осциллограмму давления. Для указанной процедуры был выбран определенный участок осциллограммы взрывного давления (между 185 и 217 мс), который выделен на рис. 5 красным цветом.

На рис. 6 приведены результаты обработки данного участка осциллограммы. На верхнем графике рис. 6 приведен фрагмент осциллограммы взрывного давления, а на нижнем приведена производная данного фрагмента осциллограммы. Перед дифференцированием временная зависимость давления интерполировалась полиномом 5-й степени для сглаживания экспериментальных точек, что позволяет получать достоверные данные о ее производной. Интерполяционная кривая, которая впоследствии численно дифференцировалась, выделена на рис. 6 синим цветом. В точке, соответствующей моменту времени $t = 211$ мс, производная имеет максимум, который означает факт превышения темпа сброса давления через вскрывающийся сбросной проем

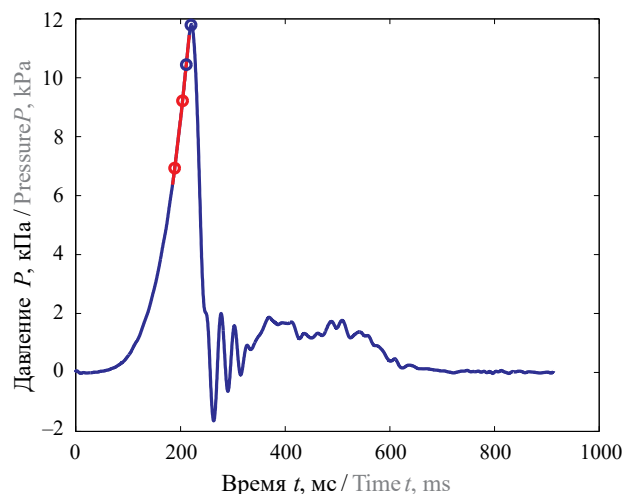


Рис. 5. Осциллограмма взрывного давления, очищенная от шумов, с указанием анализируемого участка

Fig. 5. Explosive pressure oscillogram, cleared of noise, showing the analyzed section

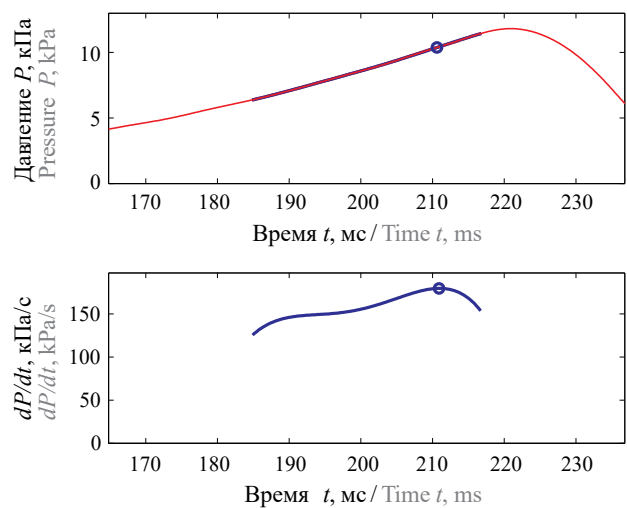


Рис. 6. Результаты обработки осциллограммы взрывного давления в испытательной камере: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; нижний график — производная фрагмента осциллограммы

Fig. 6. Results of processing the oscillogram of explosive pressure in the testing chamber: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the bottom graph is the derivative of the oscillogram fragment

над темпом нарастания давления за счет взрывного горения.

Из рис. 6 следует, что максимальное значение производной взрывного давления реализуется при $t = 211$ мс и составляет 179,7 или 0,18 кПа/мс. Этому моменту времени ($t = 211$ мс) соответствует взрывное давление 10,44 кПа.

Анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное движение стекла становится заметным только на 233-м кадре, который соответствует 200 мс и взрывному давлению 8,59 кПа. Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, показал, что заметное вскрытие сбросного проема (стекло сломалось) произошло на 211 мс при взрывном давлении 10,44 кПа.

Учитывая значительную динамику роста взрывного давления (максимальный темп роста давления составлял около 179,7 кПа/с), следует более детально рассмотреть вопрос вскрытия стекла. Анализ экспериментальной осциллограммы взрывного давления осуществлялся с учетом уравнений (3), (4) и сопутствующих их описанию замечаний.

На рис. 7 приведены результаты расчета видимой скорости пламени.

На верхнем графике рис. 7 приведен обрабатываемый участок осциллограммы давления, на среднем графике рис. 7 приведен расчет видимой скорости пламени, выполненный по формуле (3), а на нижнем — расчет радиуса фронта пламени, соответствующий текущему значению взрывного давления. Расчет радиуса фронта пламени проводился по формуле (4).

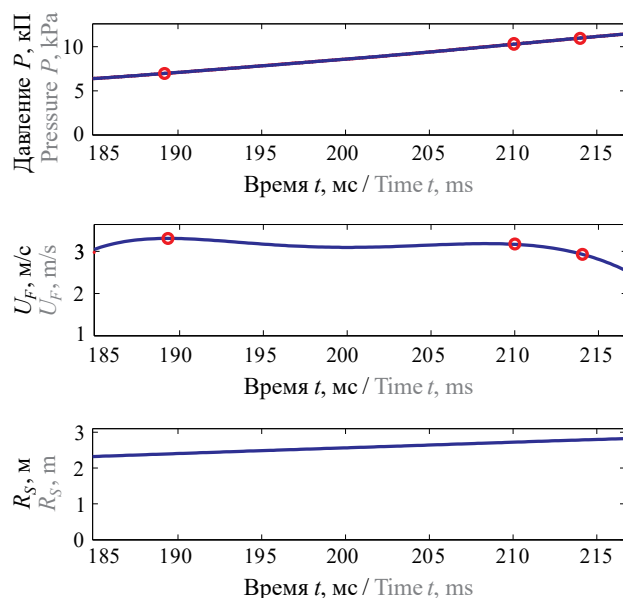


Рис. 7. Результаты обработки фрагмента осциллограммы взрывного давления: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; средний график — видимая скорость пламени; нижний график — радиус фронта пламени

Fig. 7. Results of processing the fragment of the explosive pressure oscillogram: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the middle graph is the flame velocity; the bottom graph is the radius of the flame front

Из данного рисунка следует, что максимальное значение видимой скорости пламени составляет 3,31 м/с. Максимальное значение видимой скорости пламени реализуется вплоть до 210 мс, которому соответствует взрывное давление 10,29 кПа. Этому моменту времени (210 мс) соответствует значительный прогиб стекла. Разрушение стекла по киносъемке происходит на 214 мс, которая соответствует 240 кадру (2-я фотография рис. 3). Реализуемое при этом давление составляет 10,98 кПа. На этот момент времени приходится формальный спад видимой скорости пламени, что видно из рис. 7.

Таким образом, с 214 мс начинается происходить снижение темпа роста взрывного давления, что приводит к формальному (в соответствии с расчетами для замкнутого объема, выполненными по формулам (3) и (4)) снижению видимой скорости пламени, а в реальности это говорит о том, что произошла разгерметизация объема. При снижении расчетной скорости на 5 % (на рис. 7 максимальный уровень и снижение скорости на 5 % отмечено красными точками на осях ординат) можно говорить о гарантированном вскрытии проема или освобождении его от остекления. Этому моменту времени (214 мс) соответствует взрывное давление 10,98 кПа.

Таким образом, анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении видимой скорости пламени в замкнутом объеме, показал, что вскрытие

стекла произошло примерно на 214 мс при взрывном давлении 10,98 кПа.

Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении эксперимента составило не более 3,31 м/с.

Анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное разрушение стекла произошло примерно в это же время. Поэтому разрушение стекла можно контролировать по результатам скоростной киносъемки.

Рассмотрим результаты эксперимента с двойным остеклением. Регистрация процесса взрыва осуществлялась двумя скоростными камерами. Скорость фиксации первой камеры составляла 500 кадров в секунду или временной интервал между кадрами был равен 2,0 мс, а скорость протяжки второй камеры была равна 162 кадрам в секунду или временной интервал между кадрами составлял 6,19 мс.

На рис. 8 приведены фотографии двух моментов взрыва, зафиксированных второй скоростной камерой. Фотографии, полученные с относительно малой скоростью протяжки, т.е. со второй камеры, более четкие и яркие, поэтому лучше иллюстрируют процесс вскрытия двойного остекления.

На рис. 9 приведена осциллограмма взрывного давления в камере для рассматриваемого эксперимента.

Точками на рис. 9 отмечены моменты времени, соответствующие следующим значениям (в порядке

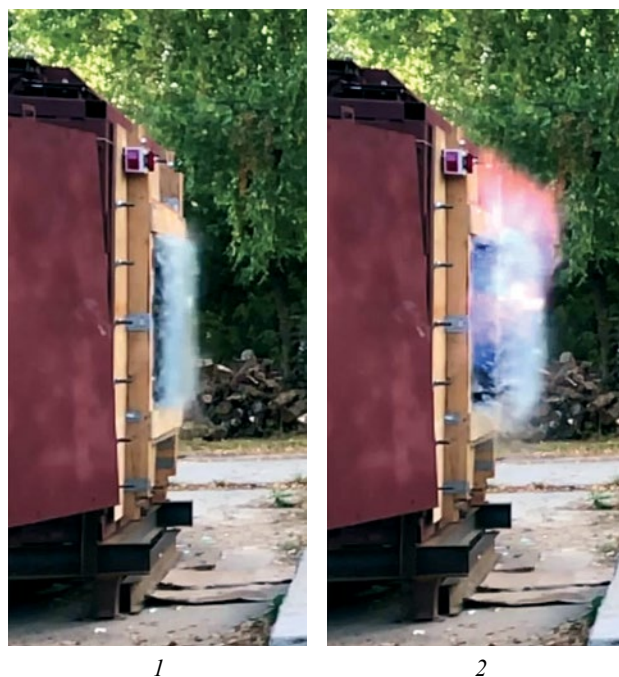


Рис. 8. Моменты вскрытия двойного остекления под воздействием взрывного давления: 1 — 266 мс (20,49 кПа); 2 — 280 мс (14,95 кПа)

Fig. 8. Double glazing relief under explosive pressure: 1 — 266 ms (20.49 kPa); 2 — 280 ms (14.95 kPa)

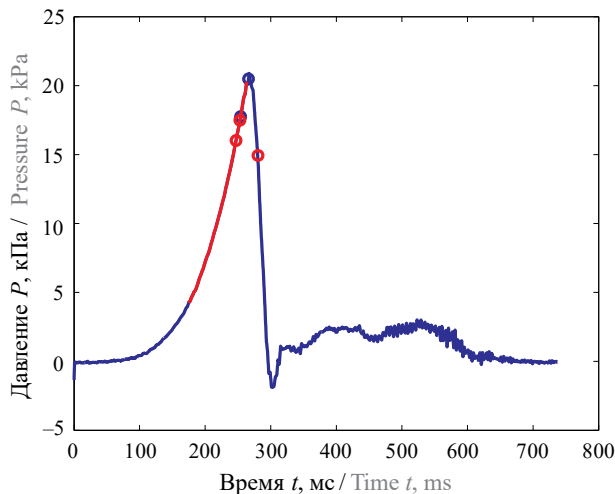


Рис. 9. Осциллограмма взрывного давления в камере с проемом, перекрытым двойным остеклением

Fig. 9. Oscillogram of explosive pressure in a chamber with an opening blocked by double glazing

возрастания): 247, 253, 254, 266, 280 мс. Этим моментам соответствуют следующие значения избыточного давления взрыва: 16,02, 17,49, 17,76, 20,49, 14,95 кПа.

Сравнение двух фотографий (рис. 8) с фотографиями (рис. 3), где приведены фотографии процесса вскрытия одинарного остекления, показывает, что фотографии 3 и 4 рис. 3 примерно соответствуют моментам времени, изображенным на фотографиях 1 и 2 рис. 8. Фотография 1 (рис. 8) соответствует моменту реализации максимального давления в камере (см. осциллограмму давления на рис. 9). Аналогичному моменту времени соответствует фотография 3 рис. 3, на которой изображен момент реализации максимального давления в камере с одинарным остеклением (см. осциллограмму давления на рис. 2). Фотография 2 (рис. 8) соответствует начальному моменту спада взрывного давления в камере (см. осциллограмму давления на рис. 9). Аналогичную ситуацию фиксирует фотография 4 (рис. 3), но при взрыве в камере с одинарным остеклением (см. осциллограмму давления на рис. 2). При этом максимальные давления отличаются практически в два раза: для одинарного остекления максимальное давление составляло 11,80 кПа, а для двойного остекления максимальное давление было значительно выше и составляло 20,49 кПа.

Подробный анализ процесса вскрытия стекла, приведенный ниже, осуществлялся по фотографиям, полученным с первой кинокамеры, имевшей скорость 500 кадров в секунду. Анализ этих фотографий показал, что начальное движение стекла (начало вскрытия стекла) становится заметным только на 247 мс процесса взрыва, которому соответствует взрывное давление 16,02 кПа. Ракурс киносъемки со второй кинокамеры позволил наблю-

дать, как в определенный момент происходит разрушение внутреннего стекла (заднего стекла). Взрывное давление при этом лежит в диапазоне от 14 до 16 кПа. Именно при таких давлениях, как показали предыдущие опыты, проведенные при одинарном остеклении, происходит освобождение проема от одинарного остекления данного размера. Внешнее стекло начинает прогибаться при давлении 17,76 кПа, что видно на фотографиях, полученных с первой камеры. И только при давлении 20,49 кПа происходит вскрытие внешнего стекла, которое реализуется на 266 мс после воспламенения смеси.

Завершив анализ фотоматериалов, проанализируем полученную в рассматриваемом эксперименте осциллограмму взрывного давления, приведенную на рис. 9. Как указывалось ранее, при вскрытии остекления площадь сбросного проема увеличивается и в определенный момент темп сброса давления через проем начинает преобладать над темпом нарастания давления, создаваемого взрывом. В этом случае происходит перегиб в осциллограмме давления, т.е. производная взрывного давления, проходя через экстремум, начинает уменьшаться. Точку перегиба можно определить, анализируя осциллограмму давления. Для указанной процедуры был выбран определенный участок осциллограммы взрывного давления (между 175 и 265 мс), который выделен на рис. 9 красным цветом.

На рис. 10 приведены результаты обработки данного участка осциллограммы.

На верхнем графике рис. 10 приведен фрагмент осциллограммы взрывного давления, а на нижнем

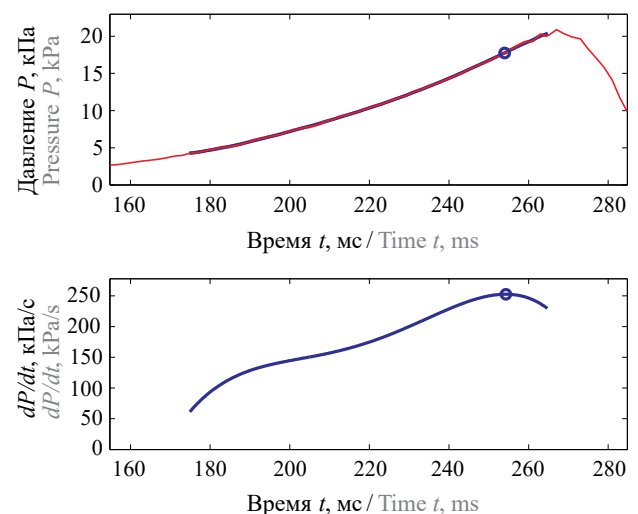


Рис. 10. Результаты обработки осциллограммы взрывного давления в камере с двойным остеклением: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; нижний график — производная фрагмента осциллограммы

Fig. 10. Results of processing the oscillogram of explosive pressure in the chamber with double glazing: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the bottom graph is the derivative of the oscillogram fragment

графике рис. 10 — производная данного фрагмента. В точке, соответствующей моменту времени $t = 254$ мс, производная имеет максимум, который означает факт превышения темпа сброса давления через вскрывающийся сбросной проем над темпом нарастания давления за счет взрывного горения.

Из рис. 10 следует, что максимальное значение производной взрывного давления реализуется при $t = 254$ мс и составляет 252,7 кПа/с или около 0,25 кПа/мс. Этому моменту времени ($t = 254$ мс) соответствует взрывное давление 17,76 кПа.

Анализ фотографий скоростной киносъемки показал, что начальное движение внутреннего стекла становится заметным примерно на 247 мс при взрывном давлении 16,02 кПа, но при этом внешнее стекло еще не разрушено.

Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, показал, что заметное вскрытие сбросного проема (внутреннее стекло сломалось) произошло ранее, чем 254 мс, и раньше, чем реализовалось взрывное давление 17,76 кПа.

Учитывая значительную динамику роста взрывного давления (максимальный темп роста давления составлял около 252,7 кПа/с), следует более детально рассмотреть вопрос вскрытия стекла.

На рис. 11 приведены результаты расчета видимой скорости пламени. На верхнем графике рис. 11 приведен обрабатываемый участок осциллограммы давления, на среднем — видимая скорость пламени,

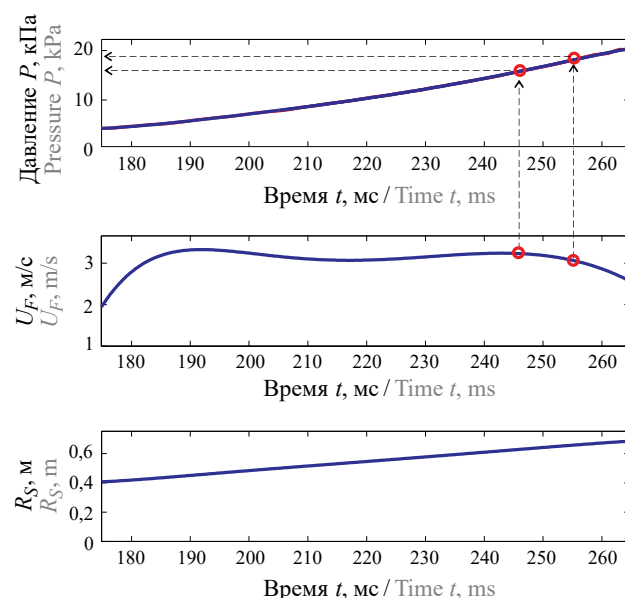


Рис. 11. Результаты обработки фрагмента осциллограммы взрывного давления: верхний график — фрагмент обрабатываемой осциллограммы; средний график — видимая скорость пламени; нижний график — радиус фронта пламени

Fig. 11. The results of processing the fragment of the oscillogram of explosive pressure: the top graph is the fragment of the processed oscillogram; the middle graph is the flame velocity; the bottom graph is the radius of the flame front

на нижнем — радиус фронта пламени, соответствующий текущему значению радиуса фронта пламени.

Из рисунка следует, что максимальное значение видимой скорости пламени составляет 3,33 м/с при ее среднем значении 3,09 м/с на рассматриваемом временном отрезке. Максимальное значение видимой скорости пламени реализуется вплоть до 247 мс, которому соответствует взрывное давление 16,02 кПа. Разрушение стекла по киносъемке происходит примерно на 254 мс. Реализуемое при этом давление составляет 17,76 кПа. На этот момент времени приходится формальный спад видимой скорости пламени, что видно из рис. 11.

Таким образом, с 254 мс начинает происходить снижение темпа роста взрывного давления, что приводит к формальному (в соответствии с расчетами для замкнутого объема) снижению видимой скорости пламени, а в реальности это говорит о том, что произошла разгерметизация объема. При снижении расчетной скорости на 5 % (на рис. 11 максимальный уровень и снижение скорости на 5 % отмечены красными точками на осях ординат) можно говорить о гарантированном вскрытии проема или ЛСК. Этому моменту времени (254 мс на графике рис. 11) соответствует взрывное давление 17,76 кПа.

Таким образом, анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении видимой скорости пламени в замкнутом объеме, показал, что вскрытие двойного остекления произошло примерно на 254 мс при взрывном давлении 17,76 кПа.

Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении эксперимента с двойным остеклением составляло не более 3,33 м/с. Среднее значение видимой скорости пламени на рассматриваемом временном отрезке составляло 3,09 м/с.

Выводы

Анализ фотографий, полученных при помощи скоростной киносъемки, показал, что заметное движение одиночного стекла начинается на 200 мс процесса взрыва. Из осциллограммы взрывного давления следует, что этому моменту времени соответствует давление 8,59 кПа. Значительный прогиб стекла наблюдается примерно на 210 мс процесса взрыва. Этому моменту времени соответствует давление 10,29 кПа. Разрушение стекла по его границе происходит примерно через 4 мс или на 214 мс при давлении 10,98 кПа.

Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, и анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении видимой скорости пламени в замкнутом объеме, показали аналогичный результат.

При проведении экспериментальных исследований создавалась значительная динамика роста взрывного давления, максимальный темп роста давления составил 179,7 кПа/с. Максимальное значение взрывного давления составило 11,80 кПа и реализовалось на 220 мс после воспламенения смеси. Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении опыта составляло 3,31 м/с при средней скорости 3,00 м/с.

Анализ фотографий, полученных при помощи скоростной киносъемки, показал, что заметное движение внешнего стекла двойного остекления начинается примерно на 247 мс процесса взрыва. Взрывное давление составляет в этот момент 16,02 кПа, но при этом фотографии не указывают на факт разрушения стекла.

Из осциллограммы взрывного давления следует, что разрушение стекла или вскрытие сбросного проема произошло на 254 мс при давлении 17,76 кПа.

Анализ взрывной осциллограммы, основанный на определении точки ее перегиба, показал, что гарантированное вскрытие проема также произошло на 254 мс при давлении 17,76 кПа, что подтверждает озвученный выше вывод о вскрытии остекления к этому моменту времени.

При проведении экспериментальных исследований создавалась значительная динамика роста взрывного давления, максимальный темп роста давления составил 252,7 кПа/с.

Максимальное взрывное давление реализовалось на 266 мс после воспламенения смеси и составило 20,49 кПа.

Максимальное значение видимой скорости пламени при проведении опыта составляло 3,33 м/с при средней скорости 3,09 м/с.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что при значительных градиентах взрывного давления (150–250 кПа/с), что характерно при аварийных взрывах в относительно малых помещениях, например в типовых кухнях массовой застройки, остекленные оконные проемы могут не выполнять функцию сбросных проемов при аварийных взрывах. Вскрытие одинарного 4-миллиметрового стекла с площадью 1 м² произошло только при взрывном давлении 10,98 кПа, а вскрытие двойного остекления осуществилось при давлении в 20,49 кПа. Эксперименты показали, что предполагаемые (расчетные) давления вскрытия остекления, рекомендуемые рядом нормативных документов и научных публикаций, могут значительно отличаться от реальных значений, что может послужить причиной обрушений зданий при аварийных внутренних взрывах.

При испытаниях как одинарного, так и двойного остекления наблюдался значительный разлет осколков (до 30 м в глубину и до 13 м в ширину), что в случае аварии может привести к поражению людей, находящихся рядом со зданием в момент аварии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пилюгин Л.П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. М. : Стройиздат, 1988. 305 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. Gorev V.A., Korolchenko A. Impact of the idle run of a rotating easily dumped structure on pressure in the room // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052069. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052069
4. Поландов Ю.Х., Бабанков В.А. Влияние места расположения источника воспламенения в помещении на развитие взрыва газа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. № 3. С. 68–76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21639722>
5. Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures // Combustion Science and Technology. 2010. Vol. 182. Issue 11. Pp. 1915–1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415
6. Гимранов Ф.М. Оценка последствий взрыва бытового газа // Промышленная и экологическая безопасность. 2012. № 2 (64). С. 150–151.
7. Чешко И.Д., Смирнов А.С., Тумановский А.А. Загорание утечек бытового газа, инициированное электрическими аварийными режимами // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2017. № 4 (25). С. 77–85.
8. Korolchenko A.D. New protecting structures on buildings of explosive production // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1425. Issue. 1. P. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012011
9. Cen K., Tang J.Y., Zhang Y., Wang F., Zha S.X., Luo M. Safetymanagement effectiveness evaluation of indoor gas facilities based on SE-DEA // Oil & Gas Storage and Transportation. 2018. Vol. 37. Issue 5. Pp. 486–492, 532.
10. Cen K., Song B., Shen R., Zhang Y., Yu W., Wang Q. Dynamic characteristics of gas explosion and its mitigation measures inside residential buildings // Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2019/2068958
11. Xu Y., Yimiao H., Guowei M. A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures // Underground Space. 2019.

- Vol. 5. Issue 4. Pp. 298–314. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
12. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Expediency of application of explosion-relief constructions to ensure explosion resistance of production buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. P. 04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029
 13. Корольченко О.Н., Корольченко А.Д. Определение давления вскрытия легкобрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 7. С. 914–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921
 14. Koshiba Y., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H. Flammability limits, explosion pressures, and applicability of le Chatelier's rule to binary alkane–nitrous oxide mixtures // *Journal of loss prevention in the process industries*. 2017. Vol. 45. Pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
 15. Janès A. Hazard characterization and risks assessment of ATEX explosion, contribution to the improvement of industrial processes safety. Perrin, Laurent : Université de Lorraine. 2012. 160 p.
 16. Pan Z., Zhang Z., Yang H., Zhang P., Zhu Y. Experimental and numerical investigation on flame propagation and transition to detonation in curved channel // *Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 118. P. 107036. URL: [ciece/article/pii/S1270963821005460](https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107036) DOI: 10.1016/j.ast.2021.107036
 17. Yang Z., Zhao K., Song X., Li B., Zhang D., Xie L. Effects of mesh aluminium alloys and propane addition on the explosion-suppression characteristics of hydrogen-air mixture // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46. Issue 70. Pp. 34998–35013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.035
 18. Kawabata M., Maeda K., Yamanaka M., Nakaoaka T., Kawabata K.S., Aoki K., Anupama G. et al. Intermediate luminosity type Iax Supernova 2019muj with narrow absorption lines: Long-lasting radiation associated with a possible bound remnant predicted by the weak deflagration model // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2021. Vol. 73. Issue 5. Pp. 1295–1314. DOI: 10.1093/pasj/psab075
 19. Yücel F.C., Habicht F., Arnold F., King R., Bohon M., Paschereit C.O. Controlled autoignition in stratified mixtures // *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 232. P. 111533. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111533
 20. Zou Y., Li C. Structure design and characteristic analysis of a foam jetting pig for high-sulfur gas-liquid mixed pipelines // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021. Vol. 94. P. 104070. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104070
 21. Li C., Kang Y., Zhang Y., Luo H. Effect of double holes on crack propagation in PMMA plates under blasting load by caustics method // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021. Vol. 116. P. 103103. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103103
 22. Altunışık A.C., Önalın F., Sunca F. Effects of concrete strength and openings in infill walls on blasting responses of RC buildings subjected to TNT explosive // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2021. Vol. 45. Issue 4. Pp. 2525–2554. DOI: 10.1007/s40996-020-00563-x

REFERENCES

1. Pilyugin L.P. *Constructions of explosive production facilities*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 305. (rus).
2. Komarov A.A. *Forecasting of loads from emergency deflagration explosions and assessment of the consequences of their impact on buildings and structures : Dissertation ... Doctor of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2001; 460. (rus).
3. Gorev V.A., Korolchenko A. The effect of idling of a rotating easily resettable structure on the pressure in the room. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052069. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052069
4. Polandov Yu.Kh., Babankov V.A. Effect of location source of fire in the room on the development of gas explosion. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 3:68-76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21639722> (rus).
5. Bauvens K.R., Chaffee J., Dorofeev S. The influence of the ignition site, the size of the vent and obstacles on the overpressure during an explosion in propane-air mixtures. *Combustion Science and Technology*. 2010; 182(11):1915-1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415
6. Gimranov F.M. Assessment of the consequences of an explosion of household gas. *Industrial and environmental safety*. 2012; 2(64):150-151. (rus).
7. Cheshko I.D., Smirnov A.S., Tumanovsky A.A. Ignition of household gas leaks initiated by electrical emergency modes. *Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2017; 4(25):77-85. (rus).
8. Korolchenko A.D. New protective structures on buildings of explosive production. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425(1):012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012011
9. Cen K., Tang J.Y., Zhang Yu., Wang F., Zha S.H., Lo M. Assessment of the effectiveness of safety management of indoor gas installations based on SE-DEA. *Storage and Transportation of Oil and Gas*. 2018; 37(5):486-492, 532.
10. Cen K., Song B., Shen R., Zhang Y., Yu W., Wang Q. Dynamic characteristics of a gas explosion and measures to mitigate it inside residential build-

- ings. *Mathematical Problems in Technology*. 2019; 2019:1-15. DOI: 10.1155/2019/2068958
11. Xu Y., Yimiao H., Guowei M. Review of the influence of various factors on gas explosions in underground structures. *Underground Space*. 2019; 5(4):298-314. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
 12. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. The expediency of using explosion-proof structures to ensure the explosion resistance of industrial buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029
 13. Korolchenko O.N., Korolchenko A.D. Determining the burst pressure of vent structures with account taken of wind loads. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(7):914-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.914-921 (rus).
 14. Koshiya Yu., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H. Limits of flammability, explosion pressure and applicability of the Le Chatelier rule to binary mixtures of alkane-nitrous oxide. *Journal of Loss Prevention in the Processing Industry*. 2017; 45:11-19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
 15. Janes A. *Hazard characterization and ATEX explosion risk assessment, contribution to improving the safety of industrial processes*. Perrin, Laurent; University of Lorraine. 2012; 160.
 16. Pan Z., Zhang Z., Yang H., Zhang P., Zhu Yu. Experimental and numerical investigation of flame propagation and transition to detonation in a curved channel. *Aerospace Science and Technology*. 2021; 118:107036. URL: [ciece/article/pii/S1270963821005460](https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107036) DOI: 10.1016/j.ast.2021.107036
 17. Yang Z., Zhao K., Song X., Li B., Zhang D., Xie L. The effect of mesh aluminum alloys and the addition of propane on the characteristics of suppressing the explosion of a hydrogen-air mixture. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021; 46(70):34998-35013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.035
 18. Kawabata M., Maeda K., Yamanaka M., Nakaoaka T., Kawabata K.S., Aoki K., Anupama G. et al. Intermediate luminosity type Iax supernova 2019muj with narrow absorption lines: long-term radiation associated with a possible bound remnant predicted by the weak deflagration model. *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2021; 73(5):1295-1314. DOI: 10.1093/pasj/psab075
 19. Yucel F.S., Habicht F., Arnold F., King R., Bokhon M., Paschereit S.O. Controlled spontaneous ignition in stratified mixtures. *Gorenje i flam*. 2021; 232:111533. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111533
 20. Zou Yu., Li S. Design of the structure and analysis of the characteristics of a foam jet device for pipelines with a high sulfur content mixed with gas-liquid mixtures. *Journal of Science and Technology on Natural Gas*. 2021; 94:104070. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.104070
 21. Li S., Kang Yu., Zhang Yu., Lo H. The effect of double holes on the propagation of cracks in PMMA plates under explosive load by caustics. *Theoretical and applied mechanics of destruction*. 2021; 116:103103. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103103
 22. Altunshykh A.S., Onalan F., Suncha F. The influence of the strength of concrete and holes in filling walls on the explosive reaction of RC buildings exposed to TNT explosives. *Iranian Journal of Science and Technology, Proceedings of Civil Engineering*. 2021; 45(4):2525-2554. DOI: 10.1007/s40996-020-00563-x

Поступила 2.11.2022, после доработки 18.11.2022;
принята к публикации 1.12.2022

Received November 2, 2022; Received in revised form November 18, 2022;

Accepted December 1, 2022

Информация об авторах

КОМАРОВ Александр Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 155673; Scopus Author ID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Москов-

Information about the authors

Alexander A. KOMAROV, Dr. Sci. (Eng.), 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: 155673; Scopus Author ID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),

ский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

ГРОМОВ Николай Викторович, канд. техн. наук, заместитель директора Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 550242; Scopus Author ID: 57192376754; e-mail: newdayru@bk.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Nikolay V. GROMOV, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 550242; Scopus Author ID: 57192376754; e-mail: newdayru@bk.ru

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

The authors declare that there is no conflict of interest.