

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 9–16
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):9-16

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.83

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.9-16>

Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам

Антон Дмитриевич Корольченко ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Аварийные газовые взрывы происходят как на производственных объектах, так и в жилых зданиях. Был проведен анализ нормативных документов в области взрывоустойчивости зданий и конструкций, подверженных аварийному взрыву, который выявил отсутствие требований к ним по взрывоустойчивости и методов испытаний их на устойчивость к дефлаграционному аварийному взрыву.

Цель. Коллективом Института комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ИКБС НИУ МГСУ) была разработана методика испытаний по определению устойчивости сборных металлических конструкций к воздействию дефлаграционного взрыва газопаровоздушной смеси и проведено исследование, включающее два эксперимента и анализ результатов с целью определить возможность применения ограждающих конструкций в области взрывозащиты зданий и сооружений от избыточного давления дефлаграционного взрыва.

Материалы и методы. Исследования проводились с использованием стенда для испытаний легкосбрасываемых конструкций (ЛСК) по ГОСТ Р 56289. В качестве образцов для испытаний были применены сборные металлические конструкции, состоящие из стеновых сэндвич-панелей толщиной 200 мм и металлического каркаса из двух стальных труб сечением 100 мм. В процессе исследований контролировалось разрушение замкового соединения стыка панелей и полное разрушение ограждающей конструкции.

Результаты и их обсуждение. Исследования показали, что при избыточном давлении взрыва 17–18 кПа и времени воздействия взрывной нагрузки не менее 250 мс наблюдалась значительная деформация конструкции с остаточным прогибом. Полное разрушение конструкции происходило при интенсивности динамического воздействия во взрывной волне 45–47 кПа и времени воздействия взрывной нагрузки около 400 мс.

Выводы. Установлено, что сборная металлическая конструкция, состоящая из стеновых сэндвич-панелей и металлического каркаса, может быть использована в качестве взрывоустойчивого защитного ограждения на производственных объектах при расчете взрывных нагрузок. Предложено несколько вариантов повышения устойчивости конструкции к воздействию дефлаграционного взрыва.

Ключевые слова: аварийный взрыв газа; взрывобезопасность; взрывозащитные конструкции; стеновые сэндвич-панели; промышленная безопасность

Благодарности: автор выражает благодарность руководителю научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» ИКБС НИУ МГСУ Комарову Александру Андреевичу за помощь в проведении анализа результатов исследования

Для цитирования: Корольченко А.Д. Экспериментальное определение устойчивости сборных металлических конструкций к взрывным нагрузкам // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 9–16. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.9-16

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

Experimental determination of resistance of prefabricated metal structures to blast loads

Anton D. Korolchenko ✉

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

ABSTRACT

Introduction. Emergency gas explosions occur at industrial facilities as well as in residential buildings. An analysis of normative documents in the field of explosion resistance of buildings and structures subject to an accidental gas explosion has been carried out which revealed a lack of requirements for their explosion resistance and methods of testing their resistance to a deflagration accidental explosion.

Objective. A team from the Institute of Comprehensive Construction Safety at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU) developed a test procedure for determining the resistance of prefabricated metal structures to a deflagration explosion of an air-gas mixture and conducted a study including two experiments and analysis of the results to determine the application of building envelopes in the field of explosion protection of buildings and structures against excessive pressure deflagration

Materials and methods. The researches have been carried out with the use of a test bench for light-load-bearing constructions according to GOST R 56289. Fabricated metal structures, consisting of 200-mm-thick wall sandwich-panels and metal frame of two steel pipes of 100-mm section were used as test specimens. In the course of the investigations, the failure of the locking joint of the panels and the complete failure of the enclosing structure were monitored.

Results and discussion. Studies have shown that with an overpressure of 17–18 kPa and the exposure time of blast load of at least 250 ms, a significant deformation of the structure with a residual deflection was observed. Complete destruction of the structure occurred at the intensity of the dynamic impact in a 45–47 kPa blast wave and the exposure time of the blast load about 400 ms.

Conclusions. It has been established that the prefabricated metal structure consisting of wall sandwich panels and a metal frame can be used as an explosion-proof protective fence at production facilities in the calculation of blast loads. Several variants of increasing resistance of the structure to deflagration explosion have been proposed.

Keywords: emergency gas explosion; explosion safety; explosion-proof structures; wall sandwich panels; industrial safety

Acknowledgements: the author expresses his gratitude to Alexander A. Komarov, Head of the Research Center “Explosion Safety” NRU MGSU for his help in analyzing the results of the study

For citation: Korolchenko A.D. Experimental determination of resistance of prefabricated metal structures to blast loads. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):9-16. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.9-16 (rus.).

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

Введение

Аварийные газовые взрывы происходят как на производственных объектах, так и в жилых зданиях. Этим обстоятельством обусловлена актуальность решения проблемы обеспечения взрывозащиты объектов, в частности взрывоустойчивости конструкций и зданий. С этой целью был проведен анализ действующей в Российской Федерации базы нормативных документов в области взрывоустойчивости зданий и конструкций, подверженных воздействию дефлаграционного взрыва [1–6]. Для производственных зданий и помещений определено понятие взрывоопасного объекта.

В первую очередь следует упомянуть СП 56.13330.2021¹, где даны требования к взрывоустойчивым зданиям. В п. 5.2.2¹ определено, что здания, которые могут быть подвержены воздействию внешних аварийных взрывов (пункты управления, операторные и т.п.), следует выполнять взрывоустойчивыми: «Обеспечение взрывоустойчивости при внешних аварийных взрывах может осуществляться снижением избыточного давления взрыва за счет удаления зданий от потенциальных источников взрыва, а также повышением прочности и устойчивости конструкций к действию динамических нагрузок от воздушной волны взрыва».

В ГОСТ Р 57471–2017² приведены термины и определения взрывозащитных металлических конструк-

ций. Данный документ предусматривает подтверждение взрывоустойчивости конструкций посредством использования взрывчатого вещества и воздействия на них воздушной ударной волной (ВУВ). При испытании производится воздействие избыточным давлением во фронте ВУВ.

Основываясь на рассмотренных нормативных документах, можно сделать вывод, что на сегодняшний день практически не существует требований к конструкциям по взрывоустойчивости и методов испытаний их на устойчивость к дефлаграционному аварийному взрыву. В связи с этим коллективом лаборатории газодинамики и взрыва ИКБС НИУ МГСУ была разработана методика испытаний на устойчивость ограждающей конструкции (ОК) из сэндвич-панелей к воздействию дефлаграционного взрыва газопаровоздушной смеси. На основании методики были проведены два эксперимента с целью исследовать возможность применения ограждающих конструкций в области взрывозащиты зданий и сооружений от избыточного давления дефлаграционного взрыва [7–12].

В процессе исследований необходимо было определить максимальное избыточное давление в результате дефлаграционного взрыва газозвушной смеси, при котором происходит разрушение сборной металлической конструкции из стеновых сэндвич-панелей на металлическом каркасе.

Материалы и методы

Исследования проводились с использованием стенда для испытаний легкосбрасываемых кон-

¹ СП 56.13330.2021 «Свод правил. Производственные здания. СНиП 31-03–2001» (п. 5.2).

² ГОСТ Р 57471–2017 «Конструкции взрывозащитные металлические. Общие технические требования и методы испытаний».

струкций (ЛСК) на воздействие внутреннего аварийного взрыва по ГОСТ Р 56289–2014³. Стенд состоит из испытательной взрывной камеры (далее — взрывокамера), системы измерения избыточного давления, системы скоростной видеосъемки. Взрывокамера, способная выдержать давление дефлаграционного взрыва до 2 бар, представляет собой установку кубической формы с рабочим объемом 10 м³ и имеет проем для установки образца конструкции сечением до 1,6 × 1,3 м, глубиной 0,2 м. Система сброса давления включает сбросной проем сечением 0,7 × 0,7 м, который с внутренней стороны закрывается металлическими передвижными створками для изменения его сечения, а снаружи — клапаном с давлением вскрытия, равным 0 Па. На боковых гранях взрывокамеры располагаются датчики избыточного давления.

В качестве образцов для испытаний были использованы сборные металлические конструкции — сэндвич-панели, предназначенные для строительства зданий и сооружений. Сэндвич-панель — панель стеновая металлическая трехслойная с утеплителем из минераловатных плит размером 1600 × 1200 × 200 мм, с толщиной металлического листа 0,6 мм, с покрытием, нанесенным порошковой краской. Металлический каркас состоит из двух профильных стальных труб сечением 100 × 100 мм, с толщиной стенки 5 мм и межосевым расстоянием между трубами 1400 мм. Крепление сэндвич-панелей к металлическому каркасу осуществляется самосверлящимися винтами длиной 240 мм (по 8 винтов на каждую трубу металлического каркаса). Сэндвич-панели монтировались таким образом, чтобы при установке в проем замковые соединения двух частей сэндвич-панелей совпадали. Замковое соединение не уплотнялось [7, 13–16].

В процессе исследований контролировались два параметра: разрушение замкового соединения стыка панелей и полное разрушение ограждающей конструкции.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент 1. На рис. 1 представлены мгновенные снимки процесса дефлаграционного взрыва пропановоздушной смеси в камере, сбросной проем которой оборудован исследуемой на устойчивость стеновой панелью (образец 1). Киносъемка проводилась со скоростью 156 кадров в секунду. На рис. 1, *a* зафиксирован момент воспламенения смеси в камере (кадр 210). В этот момент зажигается лампочка, что хорошо видно на фотографии. На рис. 1, *b* приведен момент прорыва пламени через

неплотности, имеющиеся по периметру закрепленной панели. На рис. 1, *c–h* даны снимки процесса через каждые 10 кадров или каждые 64,1 мс.

Значения давления взрыва, зарегистрированные тремя датчиками давления, установленными на гранях камеры, приведены на рис. 2. Известно, что при дефлаграционном взрыве в помещениях кубической или близкой к кубической форме соблюдается принцип квазистатичности давления взрыва, что обусловлено малой видимой скоростью пламени по сравнению со скоростью звука. В соответствии с этим принципом давление взрыва зависит только от времени и не зависит от координаты расположения датчика. Поэтому на рис. 2 приведено среднее значение давления, полученное путем осреднения показаний трех датчиков, установленных в камере.

На рис. 2 отмечены моменты времени (точки 1–5), которым соответствуют мгновенные снимки, приведенные на рис. 1, *a*, 1, *b*, 1, *e*, 1, *f* и 1, *h*.

Точка 2 на рис. 2 соответствует времени 576,9 мс после начала взрывного горения смеси (кадр 300, см. рис. 1, *b*). Давление взрыва в этот момент составляло 16,8 кПа. На рис. 1, *b* видно, что в данный момент начинается истечение (прорыв) продуктов взрыва (взрывного горения) через неплотности, имеющиеся по периметру закрепленной панели. Давление, зафиксированное в точке 2, вызывает начало смещения (деформации) панели, что приводит к появлению дополнительных сбросных площадей, а также к расширению и увеличению уже имеющихся. Этот процесс хорошо виден на рис. 1, *e* и *f*, соответствующих моментам времени 769,2 и 833,3 мс (кадры 330 и 340 скоростной киносъемки). Появление дополнительных сбросных проемов приводит к резкому снижению давления взрыва внутри камеры (см. рис. 2). Снимок на рис. 1, *h* соответствует моменту времени 961,5 мс (кадр 360), который характеризуется сильной деформацией панели, значительным вскрытием закрываемого панелью проема и снижением внутреннего давления в камере практически до нуля (см. рис. 2).

Эксперимент 2. Рассмотрим результаты опыта с аналогичной панелью (образец 2), но при других условиях проведения испытания в камере. Киносъемка, как и в эксперименте 1, проводилась со скоростью 156 кадров в секунду.

На рис. 3 представлены мгновенные снимки процесса дефлаграционного взрыва пропановоздушной смеси в камере, сбросной проем которой оборудован исследуемой на устойчивость стеновой панелью 2. На рис. 3, *a* приведен момент воспламенения смеси в камере (кадр 432). В этот момент зажигается лампочка, что хорошо видно на снимке. На рис. 3, *b* приведен момент прорыва пламени через неплотности (кадр 515, соответствующий моменту времени 532,0 мс после воспламенения смеси в камере),

³ ГОСТ Р 56289–2014. Конструкции светопрозрачные легкосбрасываемые для зданий. Методы испытаний на воздействие внутреннего аварийного взрыва.

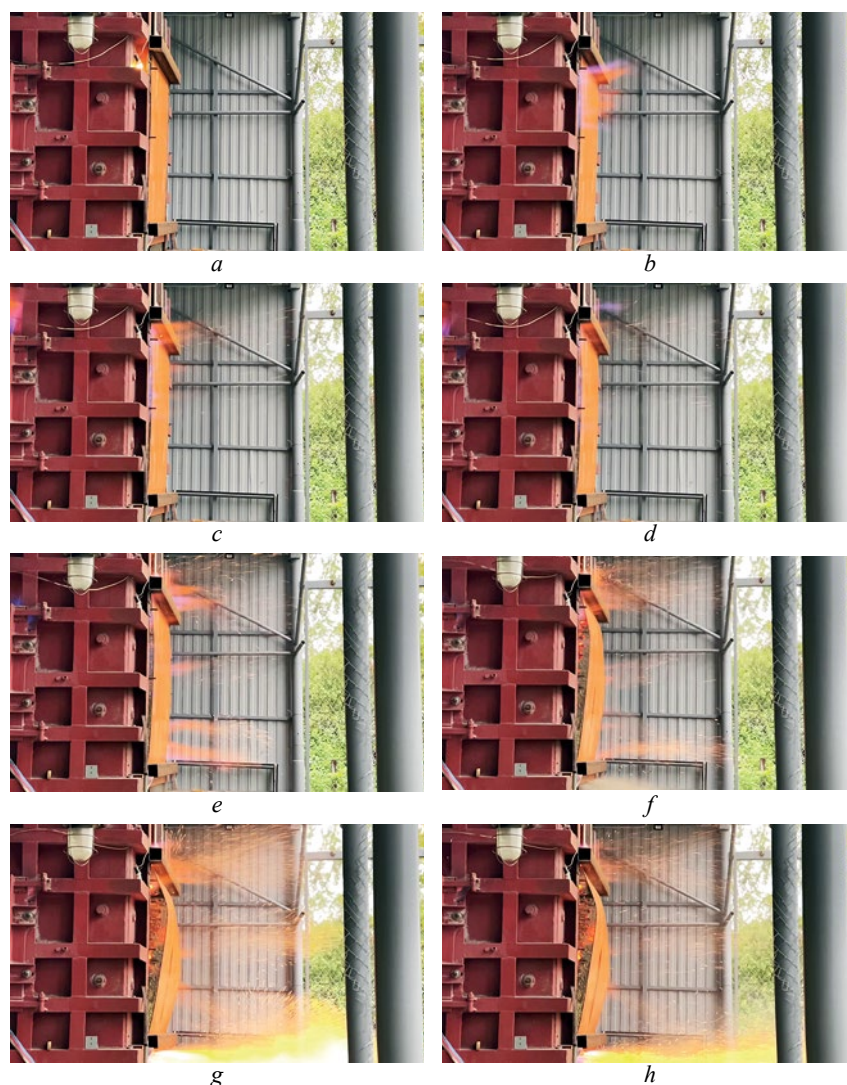


Рис. 1. Процесс взрыва пропановоздушной смеси в камере (эксперимент 1) в разные моменты времени: *a* — кадр 210,0 мс, соответствует точке 1 на рис. 2; *b* — кадр 300, 576,9 мс, соответствует точке 2 рис. 2; *c* — кадр 310, 641,0 мс; *d* — кадр 320, 705,1 мс; *e* — кадр 330, 769,2 мс, соответствует точке 3 на рис. 2; *f* — кадр 340, 833,3 мс, соответствует точке 4 рис. 2; *g* — кадр 350, 897,4 мс; *h* — кадр 360, 961,5 мс, соответствует точке 5 на рис. 2

Fig. 1. Process of propane-air mixture explosion in the chamber (experiment 1) at different moments of time: *a* — frame 210.0 ms, corresponding to point 1 in Fig. 2; *b* — frame 300, 576.9 ms, corresponding to point 2 in Fig. 2; *c* — frame 310, 641.0 ms; *d* — frame 320, 705.1 ms; *e* — frame 330, 769.2 ms, corresponding to point 3 in Fig. 2; *f* — frame 340, 833.3 ms, corresponding to point 4 in Fig. 2; *g* — frame 350, 897.4 ms; *h* — frame 360, 961.5 ms, corresponding to point 5 in Fig. 2

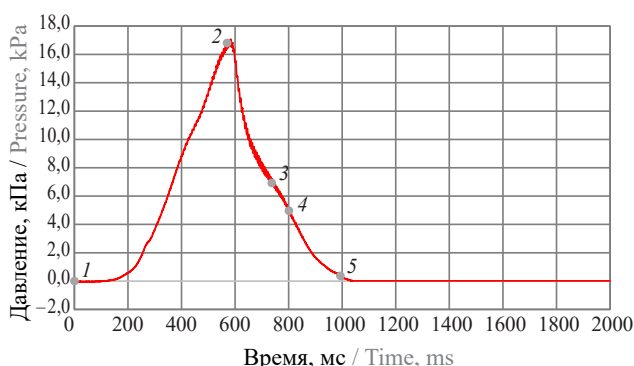


Рис. 2. Зависимость давления взрыва от времени испытания в камере (эксперимент 1)

Fig. 2. Dependence of explosion pressure on chamber test time (experiment 1)

имеющиеся по периметру закрепленной панели. На рис. 3, *c–h* приведены снимки процесса через каждые 10 кадров или каждые 64,1 мс.

Среднее значение взрывного давления, полученное путем осреднения показаний трех датчиков давления, установленных на гранях камеры, приведено на рис. 4.

На рис. 4 отмечены моменты времени (точки 1–5), которым соответствуют мгновенные снимки на рис. 3, *a–3*, *d* и 3, *g*.

Точка 2 на рис. 4 соответствует времени 532,0 мс после начала взрывного горения смеси (кадр 515, см. рис. 3, *b*). Давление взрыва в этот момент времени составляло 18,0 кПа. Из рис. 3, *b* видно, что



Рис. 3. Процесс взрыва пропановоздушной смеси в камере (эксперимента 2) в разные моменты времени: *a* — кадр 432,0 мс, соответствует точке 1 на рис. 4; *b* — кадр 515, 532,0 мс, соответствует точке 2 на рис. 4; *c* — кадр 525, 596,1 мс, соответствует точке 3 на рис. 4; *d* — кадр 535, 660,2 мс, соответствует точке 4 на рис. 4; *e* — кадр 545, 724,3 мс; *f* — кадр 555, 788,4 мс; *g* — кадр 565, 852,5 мс, соответствует точке 5 на рис. 4; *h* — кадр 575, 916,6 мс

Fig. 3. Process of explosion of propane-air mixture in the chamber (experiment 2) at different moments of time: *a* — frame 432.0 ms, corresponds to point 1 in Fig. 4; *b* — frame 515, 532.0 ms, corresponds to point 2 in Fig. 4; *c* — frame 525, 596.1 ms, corresponds to point 3 in Fig. 4; *d* — frame 535, 660.2 ms, corresponds to point 4 in Fig. 4; *e* — frame 545, 724.3 ms; *f* — frame 555, 788.4 ms; *g* — frame 565, 852.5 ms, corresponds to point 5 in Fig. 4; *h* — frame 575, 916.6 ms

этот момент характеризуется началом истечения (прорывом) продуктов взрыва (взрывного горения) через неплотности, имеющиеся по периметру закрепленной панели (в данном случае прорыв газов происходит в верхней части ее крепления). При этом давлении начинается смещение (деформация) панели, как и в эксперименте 1.

В эксперименте 2 (в отличие от эксперимента 1) происходит дальнейший значительный прирост избыточного давления. Сброс продуктов взрыва через образующиеся в результате деформации панели сбросные проемы (щели) не может компенсировать их приток, что приводит к дальнейшему росту давления в камере. Однако вскрытие про-

емов за счет деформации панели несколько снизило темп роста давления, что выразилось в образовании «полки» давления вблизи точки 2. На рис. 3, *c* показан момент времени (точка 3), когда сброс газов через вскрывающиеся проемы сравнивается с притоком продуктов взрыва, поэтому возникает максимум давления взрыва (точка 4 на рис. 3, *d*; давление 48 кПа). В дальнейшем происходит резкое снижение давления, так как площадь освобождаемого проема растет, а темп притока продуктов взрыва падает. На рис. 3, *g* (точка 5 на рис. 4) показан завершающий этап, на котором давление взрыва составляет около 2 кПа. В этот момент наблюдается истечение остатков продуктов взрыва и продолжается движе-

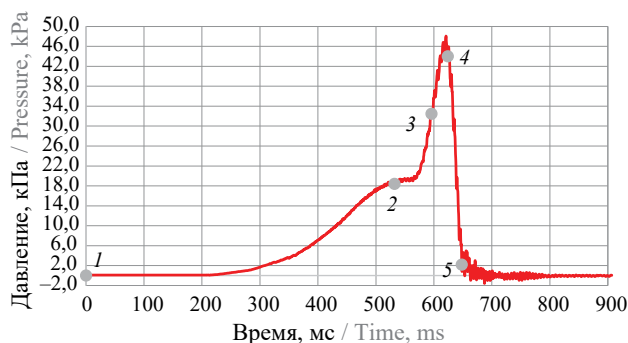


Рис. 4. Зависимость давления взрыва от времени испытания в камере (эксперимент 2)

Fig. 4. Dependence of explosion pressure on chamber test time (experiment 2)

ние панели, сломанной под действием взрывной нагрузки в точке 4.

Выводы

Анализ результатов исследования, направленного на определение устойчивости сборной металлической конструкции, состоящей из стеновых сэндвич-панелей и металлического каркаса, к взрывным нагрузкам, показал, что при защемлении панелей только с двух противоположных сторон наблюдается их значительная деформация с остаточным проги-

бом при избыточном давлении взрыва 17–18 кПа. Экспериментами установлено, что продолжительность воздействия взрывной нагрузки (нарастание от нуля до 17–18 кПа) должна составлять не менее 250–300 мс. В результате деформации панелей образуются отверстия (щели), через которые поступают газы, содержащиеся в волне сжатия, деформирующей панель. В случае формирования волны сжатия при внешнем аварийном взрыве это будет поток воздуха. Полное разрушение конструкции наблюдалось при интенсивности динамического воздействия во взрывной волне 45–47 кПа. Время воздействия взрывной нагрузки на конструкцию до ее разрушения (излома) составляло около 400 мс [7, 17–20].

Данная сборная металлическая конструкция может быть использована в качестве взрывоустойчивого защитного ограждения на производственных объектах при расчете взрывных нагрузок. Предложено несколько вариантов увеличения устойчивости конструкции к воздействию дефлаграционного взрыва газопаровоздушной смеси: уменьшение межосевого расстояния между трубами металлического каркаса и дополнительное крепление панели по ее протяженным сторонам. Эти меры могут обеспечить увеличение ее несущей способности по отношению к взрывным нагрузкам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Xia Z., Wang X., Fan H., Li Y., Jin F. Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels // *International Journal of Impact Engineering*. 2016. Vol. 97. Pp. 10–28. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.001
- Ahmed S., Galal K. Effectiveness of FRP sandwich panels for blast resistance // *Composite Structures*. 2017. Vol. 163. Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.11.066
- 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. 492 с.
- 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. Pp. 51–59.
- Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions // *18th Symposium (International) the combustion institute*. 1980. Pp. 1607–1614.
- 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
- Громов Н.В., Корольченко А.Д. Испытания сэндвич-панелей на взрывоустойчивость // *Новые технологии и перспективы развития во взрывной отрасли : тезисы докл. первой науч.-практ. конф.* Уфа, 2022. С. 20–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850>
- Максакова А.В. Исследование нормативной документации на тему легкобрасываемой конструкции и предложение по его изменению // *Молодежные инновации : сб. мат. семинара мол. уч. в рамках XXIII Междунар. науч. конф.* М., 2020. С. 144–147. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850>
- Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S. Effect of instabilities and acoustics on pressure generated in vented propane-air explosions // *22nd ICDERS July 27–31, 2009. Minsk, Belarus. 2009*. URL: <http://www.icders.org/ICDERS2009/abstracts/ICDERS2009-0058.pdf>
- 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
- Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Пожнаука, 2000. 224 с.
- Шлег А.М. Определение параметров легкобрасываемых конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2002. 201 с.

13. 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
14. Korolchenko D., Polandov Yu.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. Issue 5. P. 052056. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052056
15. Korolchenko D., Polandov Yu.K., Evich A. Dynamic effects at internal deflagration explosions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 603. Issue 5. P. 052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008
16. Комаров А.А., Корольченко Д.А., Фан Т.А. Особенности определения коэффициента динамичности при импульсных нагрузках // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 2–3. С. 37–43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43
17. Polandov Yu., Korolchenko D. The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 01040. DOI: 10.1051/mateconf/201710601040
18. Громов Н.В. Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газо-паровоздушных смесей : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2007. 134 с.
19. Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г. Определение площади вышибных конструкций в зданиях взрывоопасных производств // Промышленное строительство. 1969. № 6. С. 19–22.
20. Yankelovsky D., Kochetkov A.V., Feldgun V.R., Karinski Y.S. A simplified model for explosion venting due to the separation of a heavy protective cover // International Journal of Protective Structures. 2012. Vol. 3. Issue 1. Pp. 81–103. DOI: 10.1260/2041-4196.3.1.81

REFERENCES

1. Xia Z., Wang X., Fan H., Li Y., Jin F. Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*. 2016; 97:10-28. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.001
2. Ahmed S., Galal K. Effectiveness of FRP sandwich panels for blast resistance. *Composite Structures*. 2017; 163:454-464. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.11.066
3. 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).
4. 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.). Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 1997; 51-59.
5. Solberg D.M. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions. *18th Symposium (International) the combustion institute*. 1980; 1607-1614.
6. 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
7. Gromov N.V., Korolchenko A.D. Testing of sandwich panels for explosion resistance. *New technologies and development prospects in the explosive industry : abstracts of the first scientific and practical conference*. Ufa, 2022; 20-22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850> (rus).
8. Maksakova A.V. A study of regulatory documentation on the topic of a lightweight structure and a proposal to change it. *Youth Innovations : a collection of materials of the seminar of young scientists in the framework of the XXIII International Scientific Conference*. Moscow, 2020; 144-147. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49528850> (rus).
9. Bauwens C.R., Chaffee J., Dorofeev S. Effect of instabilities and acoustics on pressure generated in vented propane-air explosions. *22nd ICDERS July 27–31, 2009 Minsk, Belarus*. URL: <http://www.icders.org/ICDERS2009/abstracts/ICDERS2009-0058.pdf>
10. 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
11. Pilyugin L.P. *Ensuring the explosion resistance of buildings with the help of safety structures*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000; 224. (rus).
12. Shleg A.M. *Determination of the parameters of easily dropped structures : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2002; 201. (rus).
13. Polandov Yu.K., Korolchenko D.A., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).

14. 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
15. 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
16. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Phan T.A. Features of determination of the dynamic amplification factor under impulse loads. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):37-43. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.37-43 (rus).
17. Polandov I., Korolchenko D. The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:01040. DOI: 10.1051/mateconf/201710601040.
18. Gromov N.V. *Improvement of the technical system for ensuring the explosion resistance of buildings during explosions of gas-air mixtures : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Moscow, MGSU, 2007; 134. (rus).
19. Strel'chuk N.A., Orlov G.G. Determination of the area of blast structures in buildings of explosive industries. *Industrial Construction*. 1969; 6:19-22. (rus).
20. Yankelevsky D., Kochetkov A.V., Feldgun V.R., Karinski Y.S. A simplified model for explosion venting due to the separation of a heavy protective cover. *International Journal of Protective Structures*. 2012; 3(1):81-103. DOI: 10.1260/2041-4196.3.1.81

Поступила 03.05.2023, после доработки 23.05.2023;

принята к публикации 01.06.2023

Received May 3, 2023; Received in revised form May 23, 2023;

Accepted June 1, 2023

Информация об авторе

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний лаборатории газодинамики и взрыва, Институт комплексной безопасности в строительстве (ИКБС); преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; ORCID: 0000-0002-1383-574X; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; e-mail: ak@ikbs-mgsu.ru

Information about the author

Anton D. KOROLCHENKO, Head of Testing Sector of Laboratory of Gas Dynamics and Explosion, Institute of Integrated Safety in Construction; Lecturer of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; ORCID: 0000-0002-1383-574X; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; e-mail: ak@ikbs-mgsu.ru