

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДАВЛЕНИЯ ВСКРЫТИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА ВРАЩАЕМЫХ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДЕФЛАГРАЦИОННОМ ВЗРЫВЕ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Волчецкая Е.А., Дунаев А.А., Жамойдик С.М., Зинкевич Г.Н., Иваницкий А.Г.

*Цель.* Экспериментальное определение величины давления вскрытия запорных устройств и изменения угла поворота вращаемых легкобрасываемых конструкций при дефлаграционном взрыве топливовоздушной смеси в замкнутом объеме.

*Методы.* На испытательном полигоне Научно-исследовательского института пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь проведены испытания по определению давления вскрытия запорных устройств вращаемых легкобрасываемых конструкций. В качестве объекта исследований использовался опытный образец ворот с тремя вариантами крепления запорного устройства.

*Результаты.* В ходе проведенных экспериментальных исследований определены значения давления вскрытия запорных устройств и изменения угла поворота полотен ворот при дефлаграционном взрыве. По результатам анализа данных экспериментальных исследований установлено влияние вида и количества крепежных элементов на величину максимального избыточного давления взрыва в помещении, давления вскрытия запорных устройств, а также изменения угла поворота вращаемой легкобрасываемой конструкции.

*Область применения исследований.* Результаты проведенных исследований в дальнейшем могут быть использованы при разработке математической модели процесса вскрытия вращаемых легкобрасываемых конструкций, методики определения давления вскрытия запорных устройств таких конструкций с последующим внесением изменений в действующие технические нормативные правовые акты системы противопожарного нормирования и стандартизации Республики Беларусь.

*Ключевые слова:* взрыв, избыточное давление, вращаемая легкобрасываемая конструкция, запорное устройство, давление вскрытия.

(Поступила в редакцию 13 января 2023 г.)

### Введение

В настоящее время развитие различных отраслей промышленности требует современных и экономически обоснованных подходов к обеспечению безопасности пожаро-взрывоопасных объектов. На каждом таком объекте во взрывопожароопасных производственных и складских помещениях, как правило, имеются двери и ворота, которые возможно использовать в качестве вращаемых легкобрасываемых конструкций, особенно при недостатке имеющейся площади оконных проемов. Однако при расчете необходимой площади для защиты таких помещений возникают трудности, связанные с определением давления вскрытия запорных устройств данных конструкций [1].

В СН 2.02.05-2020<sup>1</sup> с учетом запросов активно развивающейся строительной отрасли установлена допустимость использования в качестве легкобрасываемых конструкций любых технических решений, подтвержденных испытаниями. Однако проведение испытаний нередко требует значительно больших временных и материальных затрат в сравнении с расчетными методами.

<sup>1</sup> Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020. – Введ. 12.11.20. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 70 с.

Для определения механизма взаимодействия опасных факторов взрыва топливовоздушной смеси с вращаемыми легкобрасываемыми конструкциями проведены экспериментальные исследования, позволяющие определить избыточное давление взрыва, а также поведение объекта испытания с учетом его характеристик.

Анализ литературных источников показал, что результаты ранее проведенных экспериментальных исследований [2; 3] касаются отдельных случаев использования вращающихся легкобрасываемых конструкций с заданными параметрами (масса, вариант запорного устройства, вид крепления) и не устанавливают общих зависимостей вскрытия их узлов крепления. В связи с этим возникает необходимость проведения экспериментальных исследований поведения различных вариантов запорных узлов ворот для последующего обобщения данных и определения общих зависимостей.

### **Методика исследования**

Экспериментальные исследования проводились в следующей последовательности: разработана общая методика и определены основные параметры средств измерений; разработана конструкция и изготовлен объект испытаний; подготовлена экспериментальная установка; проведены испытания по определению давления вскрытия запорных устройств вращаемых легкобрасываемых конструкций; обработаны экспериментальные данные.

Общая методика проведения экспериментальных исследований разработана на основании СТБ 1762-2007<sup>2</sup>.

В качестве объекта испытаний был изготовлен опытный образец стальных ворот для установки в проеме размерами 1500×1500 мм, состоящий из двух полотен размерами 763×1560 мм каждое. Масса одного полотна составила 26,8 кг. Ворота изготовлены из стали марки 08КП по ГОСТ 1050<sup>3</sup> толщиной 2,5 мм.

Количество приборов регистрации параметров, устанавливаемых на объекте испытаний и позволяющих определять действующие значения воздействующего давления и изменение угла поворота полотна, определено исходя из условий необходимости получения экспериментальных значений для его различных частей.

В частности, для экспериментального определения механизма воздействия избыточного давления взрыва на ворота, используемые в качестве вращаемых легкобрасываемых конструкций, возникла необходимость изучить динамические характеристики поведения полотен, поэтому использовались датчики, расположенные в углах воротных полотен на расстоянии 5 см от края полотна, в месте размещения запорного устройства и в центре масс. Датчики фиксировали величину его перемещения и изменение угла поворота. Для проведения испытаний использовали датчики на основе микроэлектромеханических систем с цифровым процессором, которые вместе с источником питания и картой памяти размещались в едином корпусе на воротном полотне.

### **Основная часть**

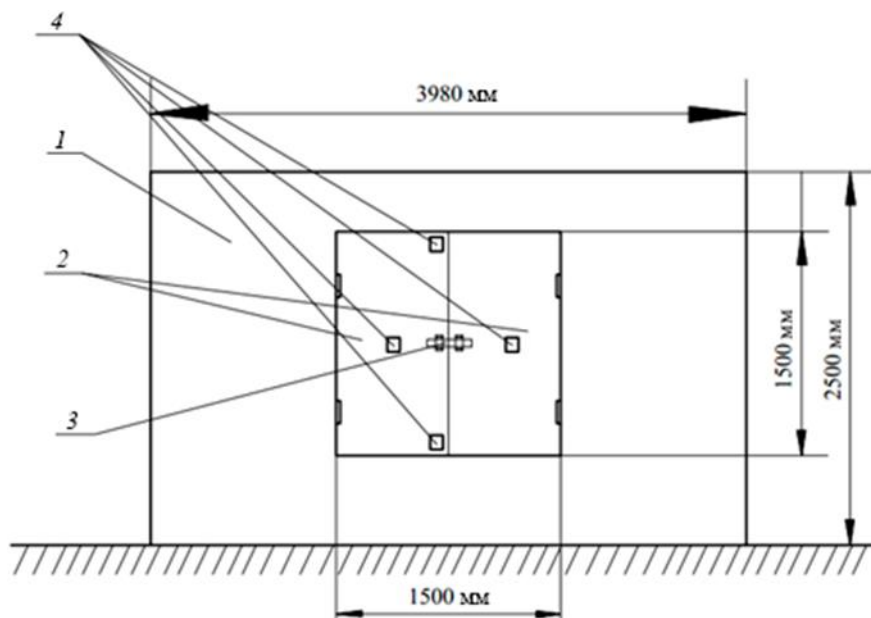
При проведении испытаний в Научно-исследовательском институте пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь использовалась сертифицированная установка размерами 800×3980×2500 мм и рабочим объемом 4,32 м<sup>3</sup> в соответствии с требованиями СТБ 1762-2007. Ее схема и крепление образца испытаний на ней приведены на рисунках 1 и 2. В камеру подавалась пропан-бутановая смесь в объеме, достаточном для получения стехиометрической концентрации с воздухом.

---

<sup>2</sup> Конструкции легкобрасываемые. Метод определения избыточного давления вскрытия: СТБ 1762-2007. – Введ. 18.07.07. – Минск: Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 2007. – 10 с.

<sup>3</sup> Металлопродукция из легированных конструкционных качественных и специальных сталей: ГОСТ 1050-2013. – Введ. 03.12.13. – М.: Стандартинформ, 2014. – 36 с.

При испытаниях проводилось измерение двух параметров, характеризующих срабатывание запорных устройств ворот: давление вскрытия запорного устройства и углы поворота воротных полотен. В состав системы измерения входили следующие устройства: датчики MPU9255 с источниками питания и картами памяти, персональный компьютер.



1 – испытательная установка; 2 – экспериментальный образец ворот; 3 – испытуемое запорное устройство ворот; 4 – места размещения датчиков MPU9255 с источниками питания и картами памяти

**Рисунок 1. – Схема взрывной камеры и закрепление на ней испытуемого образца ворот**



**Рисунок 2. – Общий вид испытательной камеры и ворот перед взрывом**

Поведение испытуемого образца при взрыве фиксировалось видеокамерой. Начало движения воротных полотен фиксировалось по записям видеокамеры.

Для расчетной оценки параметров изменения избыточного давления взрыва в герметичном объеме испытательной установки, а также при наличии открытого проема проведено моделирование процесса сгорания топливовоздушной смеси с использованием программного средства FLACS\_v.9.0 (рис. 3).

Для подтверждения воспроизводимости и достоверности результатов измерения, недопустимости повреждения измерительного оборудования и испытательной установки

перед испытаниями проводились контрольные взрывы ворот без запорных устройств. На рисунке 4 приведен график изменения давления при четырех контрольных взрывах: давление достигает максимума через 0,4 с и составляет от 0,9 до 1,0 кПа. График приведен с доверительными интервалами, определенными в результате обработки данных экспериментальных исследований по ГОСТ 8.207<sup>4</sup>.

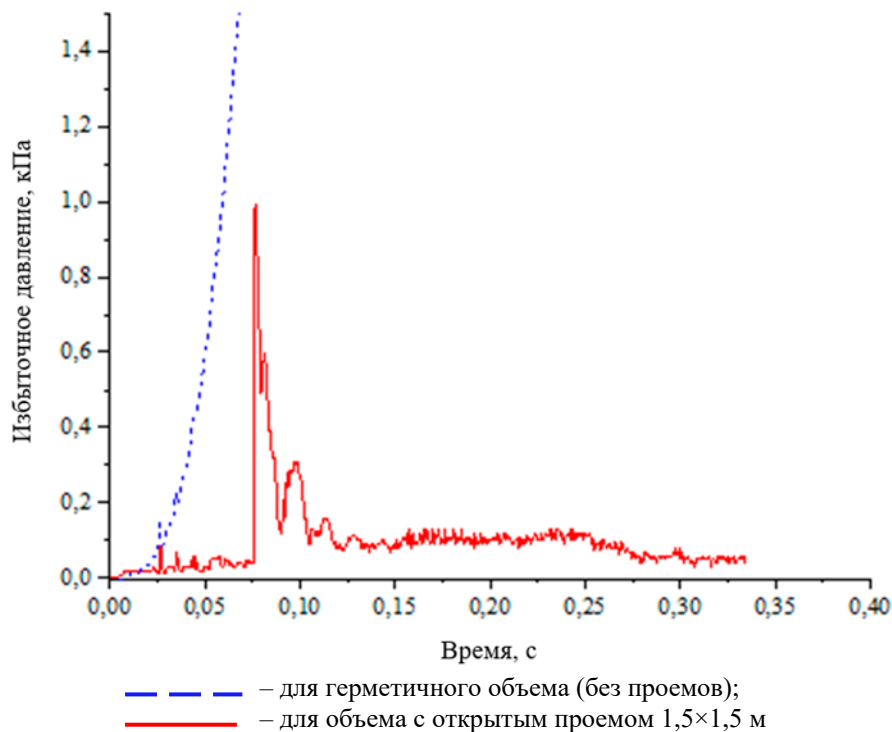


Рисунок 3. – Динамика изменения расчетного избыточного давления взрыва внутри испытательной камеры

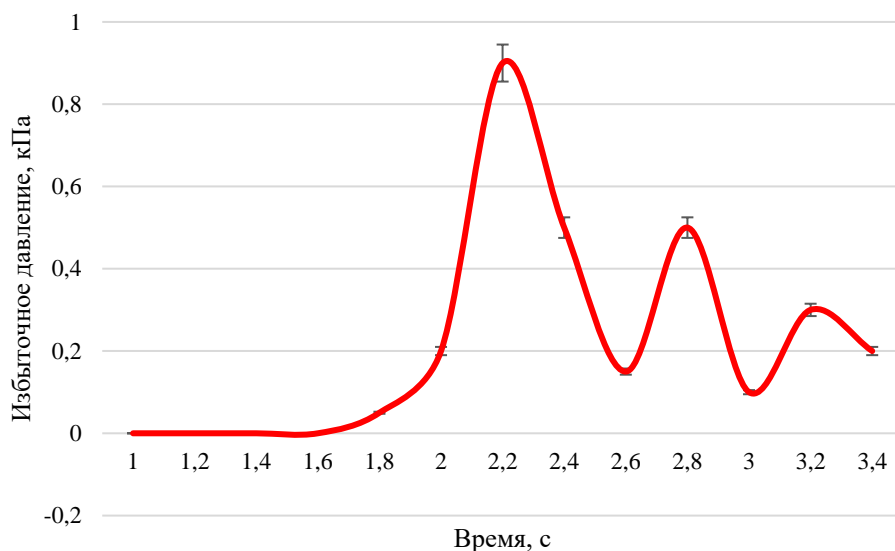


Рисунок 4. – Динамика изменения давления вскрытия воротных полотен без запорных устройств (результат обработки данных по четырем контрольным взрывам)

<sup>4</sup> Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ 8-207-76. – Введ. 15.03.76. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.

Запорные устройства № 1, 2 и 3 крепились к воротным полотнам четырьмя, восемью и двенадцатью вытяжными алюминиевыми заклепками по ISO 15980<sup>5</sup> размерами 3,2×8,0 мм соответственно (рис. 5 а, б, в). При взрыве в камере при росте избыточного давления начиналось движение воротных полотен, а вместе с ними, растягивая заклепки, сдвигался стальной засов размерами 200×50×4 мм. Момент инерции покоя одного полотна составил 15,6 кг·м<sup>2</sup>. Усилие растяжения заклепок и последующий отрыв головок в четырех, восьми и двенадцати местах представляет собой то препятствие, которое должно преодолеть избыточное давление, возникающее при дефлаграционном сгорании топливовоздушной смеси.

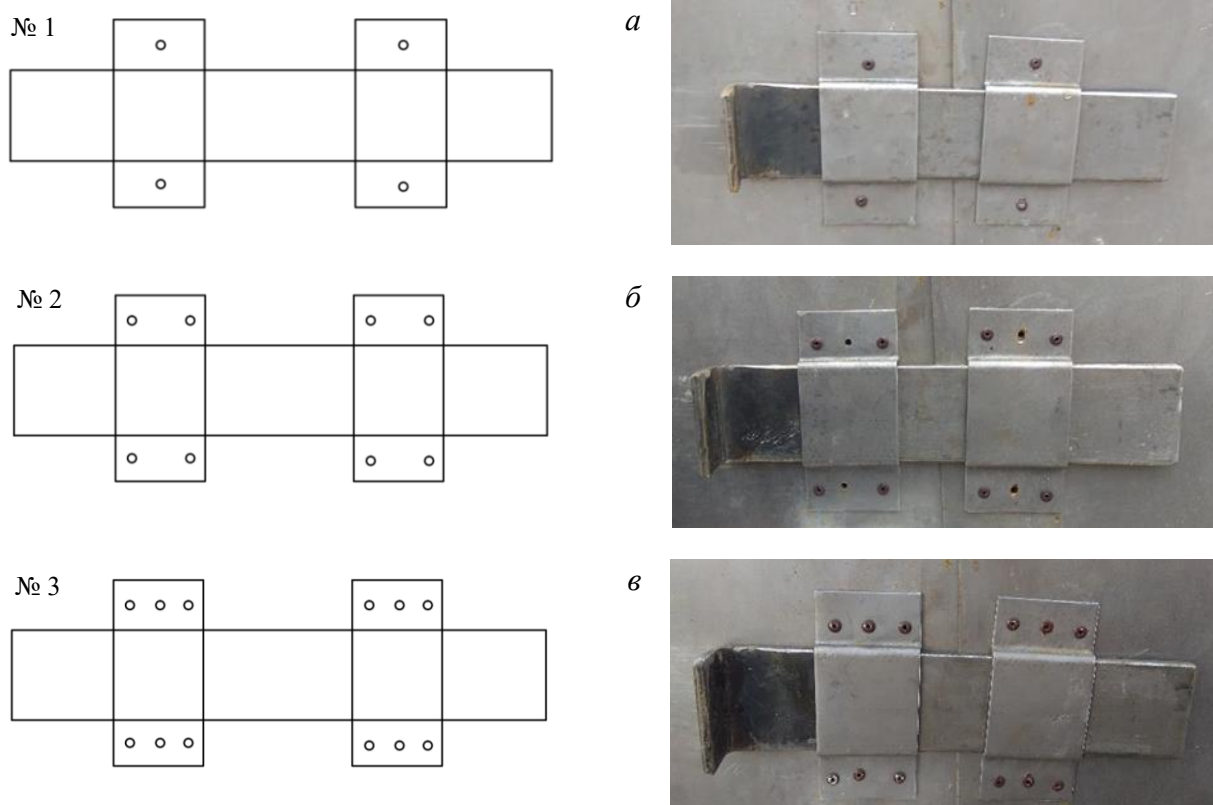


Рисунок 5. – Схемы испытуемых креплений запорных устройств к воротным полотнам

На рисунке 6 приведены кадры видеозаписи движения полотен ворот при взрыве. Запорное устройство во всех местах крепления отрывалось практически одновременно. После воспламенения газозвушной смеси давление в закрытой камере начинало расти. После вскрытия полотен и последующего достижения максимального значения наблюдались затухающие колебания давления в камере.

При испытаниях трех образцов запорного устройства № 1, 2 и 3 в камере регистрировалось максимальное избыточное давление 1,25, 1,40 и 1,50 кПа соответственно. При этом средняя величина давления вскрытия крепежных элементов № 1, 2 и 3 составила 1,08, 1,32 и 1,43 кПа соответственно.

Полученные при испытаниях легкобросываемых конструкций данные сведены в графики, представленные на рисунках 7–9, которые совместно с описанием проведенных экспериментальных исследований дают представление об их результатах. Они свидетельствуют о том, что давление вскрытия ворот зависит от вариантов креплений запорных устройств к полотнам, в нашем случае от количества заклепочных соединений. При этом зафиксированные максимальные значения величины избыточного давления взрыва в каме-

<sup>5</sup> Заклепки слепые с открытым торцом, с сердечником размыкающим натяжным и головкой потайной. St/St (стальной стержень / стальной сердечник): ISO 15980:2002. – Введ. 01.11.02. – Минск, 2002. – 12 с.

ре при проведении испытаний не превышают предельно допустимое, установленное техническими нормативными правовыми актами, в частности ТКП 45-2.02-38-2006<sup>6</sup>.



а – 0,05 с от начала воспламенения смеси



б – 0,1 с от начала воспламенения смеси



в – 0,3 с от начала воспламенения смеси



г – 0,5 с от начала воспламенения смеси

**Рисунок 6. – Процесс вскрытия экспериментального образца ворот при взрыве**

<sup>6</sup> Конструкции легкобрасываемые. Правила расчета: ТКП 45-2.02-38-2006. – Введ. 01.01.07. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2006. – 30 с. – (Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства).

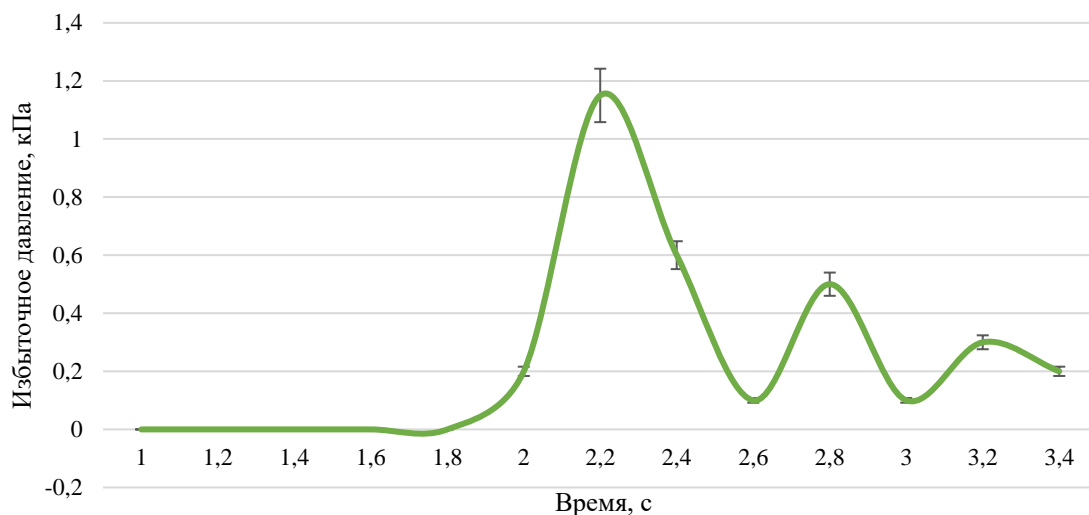


Рисунок 7. – График изменения величины избыточного давления взрыва в камере при вскрытии запорного устройства № 1 (результат обработки данных по четырем контрольным взрывам)

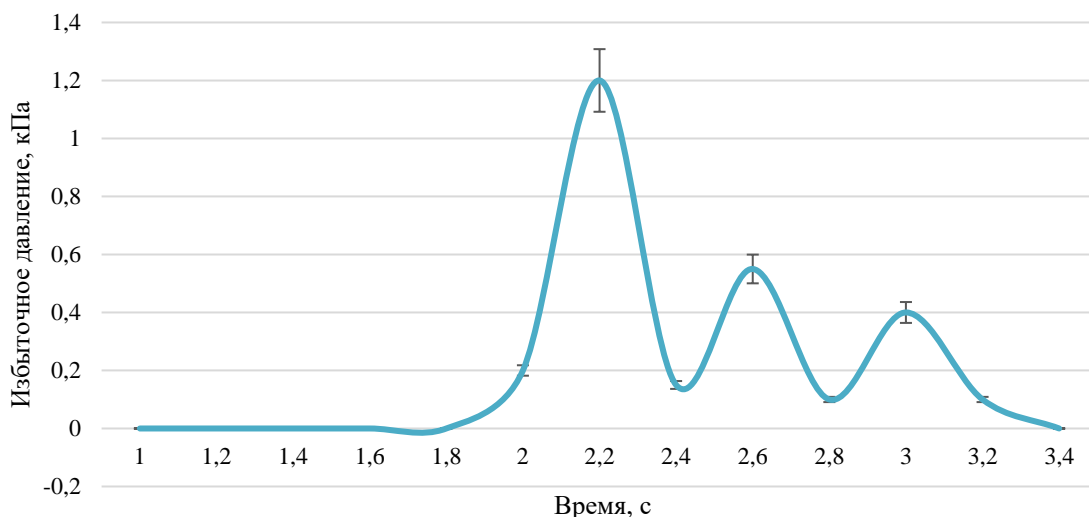


Рисунок 8. – График изменения величины избыточного давления взрыва в камере при вскрытии запорного устройства № 2 (результат обработки данных по четырем контрольным взрывам)

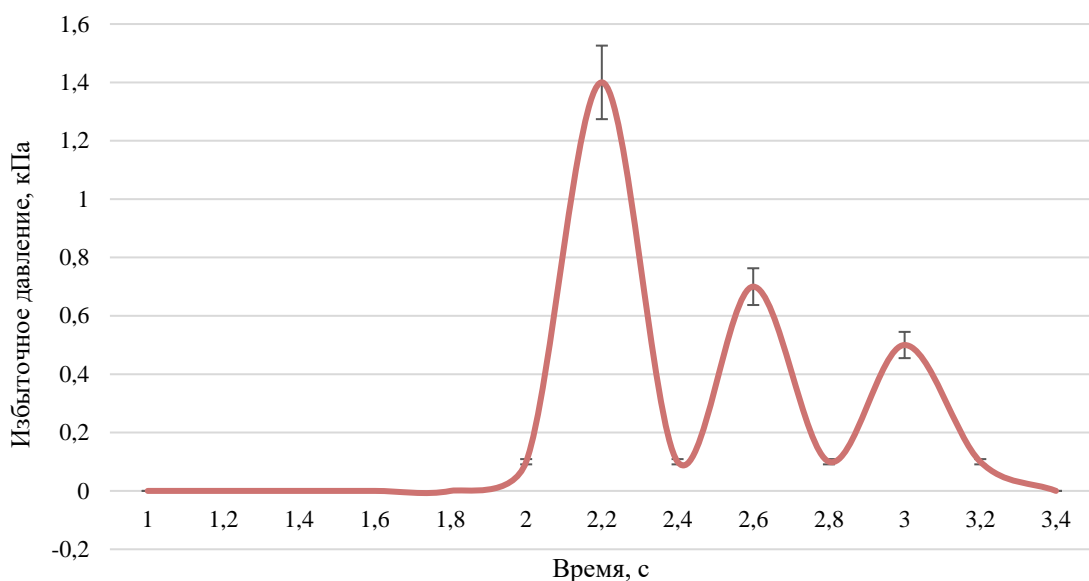


Рисунок 9. – График изменения величины избыточного давления взрыва в камере при вскрытии запорного устройства № 3 (результат обработки данных по четырем контрольным взрывам)

Изменение угла поворота воротных полотен при вскрытии испытуемых запорных устройств представлено на рисунке 10.

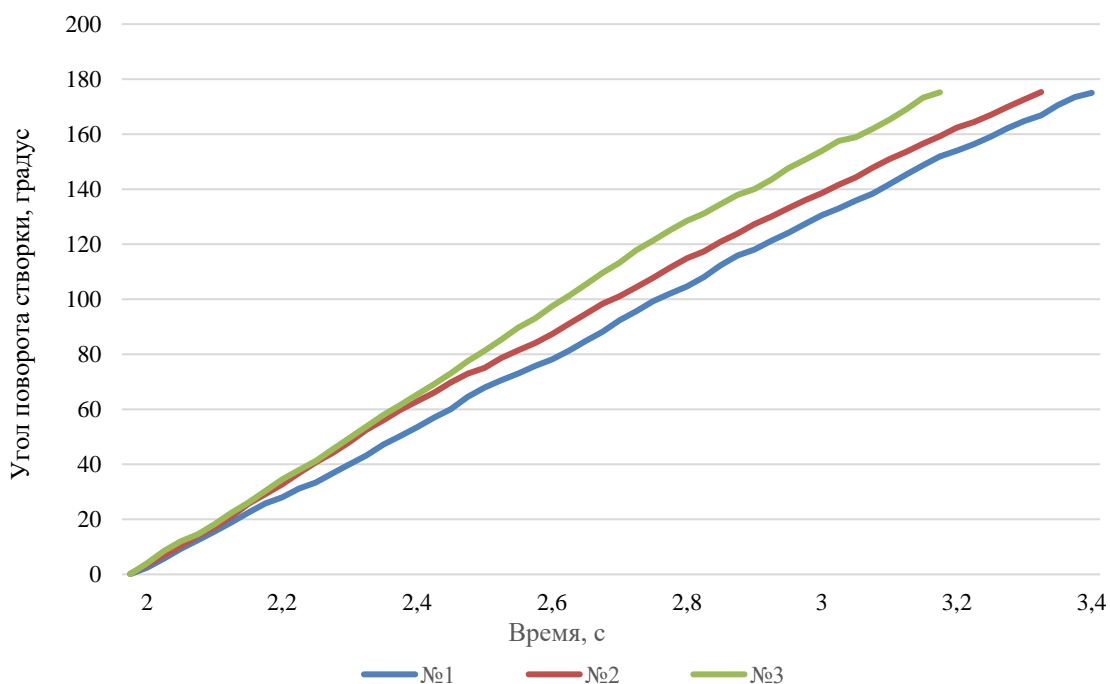


Рисунок 10. – Графики изменения угла поворота воротного полотна при вскрытии запорных устройств № 1, 2 и 3

### Заключение

В результате экспериментальных исследований определены значения максимально избыточного давления дефлаграционного взрыва в камере, давления вскрытия запорных устройств и изменения угла поворота полотен ворот. Полученные результаты свидетельствуют, что применение ворот в качестве вращаемых легкобрасываемых конструкций допустимо и зависит в первую очередь от характеристик воротных полотен, вида и крепления запорных устройств. В связи с тем что на данный момент в литературных источниках [1; 4] отсутствуют сведения об уравнениях, описывающих развитие взрыва при вскрытии запорных устройств ворот, возникает необходимость исследования механизма разрушения заклепок, разработки математической модели процесса вскрытия вращаемых ЛСК и сопоставления результатов экспериментальных исследований с расчетными данными.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Годжелло, М.Г. Расчет площади легкобрасываемых конструкций для зданий и сооружений взрывоопасных производств / М.Г. Годжелло. – М.: Стройиздат, 1981. – 48 с.
2. Орлов, Г.Г. Легкобрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий / Г.Г. Орлов. – М.: Пожнаука, 2000. – 224 с.
3. Взрывные явления. Оценка и последствия: в 2 кн. / У. Бейкер [и др.]; под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. – Кн. 1. – М.: Мир, 1986. – 319 с.
4. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.



**Экспериментальные исследования по определению давления вскрытия  
и изменения угла поворота вращаемых легкобрасываемых конструкций  
при дефлаграционном взрыве топливовоздушной смеси**

**Experimental studies to determine the opening pressure and the change of rotation angle  
of rotatable easy-to-reset structures during a deflagration explosion of an air-fuel mixture**

***Волчецкая Елена Александровна***

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра пожарной  
безопасности, преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

Email: petriko\_lena@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6129-8216

***Elena A. Volchetskaya***

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: petriko\_lena@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6129-8216

***Дунаев Александр Андреевич***

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», отдел технических  
средств и информационных технологий,  
старший инженер-программист

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

Email: tsit@ucp.by

***Aleksandr A. Dunaev***

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Department of Technical Means and Information  
Technologies, Senior Software Engineer

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: tsit@ucp.by

***Жамойдик Сергей Михайлович***

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра пожарной  
безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

Email: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

***Sergey M. Zhamoydik***

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

***Зинкевич Геннадий Николаевич***

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра пожарной  
безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

Email: zingenna@mail.ru

***Gennadiy N. Zinkevich***

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: zingenna@mail.ru

**Иваницкий Александр Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра пожарной  
безопасности, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

Email: a.ivanitski@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1219-962X

**Aleksandr G. Ivanitskiy**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Fire Safety, Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: a.ivanitski@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1219-962X

**EXPERIMENTAL STUDIES TO DETERMINE THE OPENING PRESSURE  
AND THE CHANGE OF ROTATION ANGLE OF ROTATABLE EASY-TO-RESET  
STRUCTURES DURING A DEFLAGRATION EXPLOSION OF AN AIR-FUEL MIXTURE**

**Volchetskaya E.A., Dunaev A.A., Zhamoydik S.M., Zinkevich G.N., Ivanitskiy A.G.**

*Purpose.* Experimental determination of the magnitude of the excess pressure of the explosion in the room when opening the locking devices of rotatable easy-to-reset structures and the study of their behavior during the deflagration explosion in a confined volume.

*Methods.* At the test site of the Research Institute of Fire Safety and Problems of Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, the tests were carried out to determine the opening pressure of locking devices of rotating structures planned for use as easy-to-reset. A prototype gate with three options for fastening the locking device was used as the object of research.

*Findings.* In the course of the conducted experimental studies the values of the opening pressure of the locking devices and the change in the angle of rotation of the gate leaves during a deflagration explosion were determined. Based on the results of the analysis of data from experimental studies, the influence of the type and number of fasteners on the magnitude of the excess pressure of opening locking devices, as well as the rate of change in the angle of rotation of the rotating structure, was established.

*Application field of research.* The results of the studies carried out can later be used in the development of a mathematical model of the opening process of rotating easy-to-reset structures and of the methods for determining the opening pressure of locking devices of such structures, followed by amendments to the current technical regulatory legal acts of the system of fire safety regulation and standardization of the Republic of Belarus.

*Keywords:* explosion, overpressure, rotatable easy-to-reset structure, locking device, opening pressure.

(The date of submitting: January 13, 2023)

**REFERENCES**

1. Godzhello M.G. *Raschet ploshchadi legkosbrasyvayemykh konstruksiy dlya zdaniy i sooruzheniy vzryvoopasnykh proizvodstv* [Calculation of the area of easy-to-reset structures for buildings and structures of explosive industries]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 48 p. (rus)
2. Orlov G.G. *Legkosbrasyvayemye konstruksii dlya vzryvozashchity promyshlennykh zdaniy* [Easy-to-reset structures for explosion protection of industrial buildings]. Moscow: Pozhnauka, 2000. 224 p. (rus)
3. Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., et al. *Vzryvnyye yavleniya. Otsenka i posledstviya* [Explosive phenomena. Assessment and consequences]: in 2 books, translation from English. Moscow: Mir, 1986. Book 1. 319 p. (rus)
4. Zel'dovich Ya.B. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow: Nauka, 1980. 478 p. (rus)