

Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные

© Ю. Х. Поландов[✉], Д. А. Корольченко, А. А. Евич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)

РЕЗЮМЕ

Введение. Пожары, которые происходят при газовых взрывах в бытовых помещениях, усугубляют и без того опасную ситуацию, но они возникают не всегда. Это позволяет надеяться на возможность снижения пожарных рисков при газовых взрывах за счет проведения исследований и разработки соответствующих мер.

Задача исследования определена как изучение условий, при которых возникают пожары в случае газовых взрывов в помещении. Процесс взаимодействия газов и горючих материалов характеризуется кратковременностью взрыва и нагревом горючих материалов при дефиците кислорода. Предположительно, условиями возгорания горючих материалов являются их малая теплоемкость, место положения в объеме помещения и поступление туда наружного воздуха.

Методы и средства исследования. Экспериментальные исследования проводились в кубической камере объемом 10 м³, заполненной пропан-воздушной смесью. Осуществлялась регистрация давления взрыва и видеозапись вне и внутри камеры. Для оценки уровня воздействия пламени на горючий материал использовались специально разработанные индикаторы тепловых импульсов с чувствительным элементом из бумаги. Внутри камеры было установлено 35 индикаторов.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследованиями установлено, что наименее пожароопасными местами, где тепловой импульс составлял менее 500 кДж/м², оказались углы камеры и ее пристенные области (за исключением верхней стенки), а наиболее пожароопасным — объем от центра вверх и до оконного проема по всей его ширине, где тепловой импульс составлял 600 кДж/м² и более. В местах склейки бумаги и проволоки коксование было заметно меньше, чем на остальной ее части. Бумага, находившаяся в пожароопасной зоне, воспламенялась при поступлении наружного воздуха после взрыва.

Выводы. Предположения об условиях возникновения пожара при газовом взрыве в помещении подтвердились: опасность возникновения пожара зависит от теплоемкости горючих материалов, места их положения в объеме и поступления наружного воздуха в камеру после взрыва.

Ключевые слова: статистика; эксперимент; индикаторы тепловых импульсов; горючие материалы; воспламенение.

Для цитирования: 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.

✉ Поландов Юрий Христофорович, e-mail: polandov@yandex.ru

Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data

© Yuri Kh. Polandov[✉], Dmitry A. Korolchenko, Andrey A. Evich

National Research Moscow State University of Civil Engineering
(Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Fires that occur when gas explosions occur in residential areas exacerbate an already dangerous situation, but they do not always happen. This allows us to hope for the possibility of reducing fire risks in gas explosions by conducting research and developing measures for this.

The task of the research is defined as the study of the conditions under which fires occur in the case of gas explosions in the room. The process of interaction of gases and combustible materials is characterized by short-term explosion and heating of combustible materials with a lack of oxygen. Presumably, the conditions for the ignition of combustible materials are their low heat capacity, the location of the position in the volume and the flow of external air into the chamber.

Methods and means of research. The research was carried out experimentally on a 10 m³ cubic chamber filled with propane-air mixture. The explosion pressure was recorded and video was recorded outside and inside the chamber. To assess the level of flame impact on the combustible material, the developed indicators of heat flows with a sensitive element in the form of paper were used. There were 24 indicators inside the chamber.

Research result and discussion. It was found that less fire-dangerous places, where the thermal impulse was no more than 500 kJ/m², were the corners of the chamber and its wall areas, excluding the upper wall, and more fire-dangerous was the volume from the center up to the window opening along its entire width, where the thermal impulse was 600 kJ/m² or more. There were no visible traces of coking in the places where the paper and wire were glued together. The paper, which was in a fire-hazardous area, ignited when the outside air came in after the explosion.

Assumptions about the conditions of fire in a gas explosion in the room were confirmed: the risk of fire depends on the heat capacity of the combustible materials, their position in the volume and the flow of external air into the chamber after the explosion.

Keywords: statistics; experiment; heat flow indicators; combustible materials; ignition.

For citation: Yu. Kh. Polandov, D. A. Korolchenko, A. A. Evich. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 9–21 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21.

✉ Polandov Yurii Khristoforovich, e-mail: polandov@yandex.ru

Введение

Постановка задачи. Большинство газовых взрывов происходит в бытовых помещениях жилых зданий (табл. 1) [1–9]. Развиваемая при этом температура газов, как правило, значительно выше той, при воздействии которой воспламеняются горючие материалы (ГМ). Вероятно, в силу этого с молчаливого согласия научного и практикующего сообщества у нас и за рубежом принято считать, что газовый взрыв непременно должен привести к возникновению пожара внутри помещения. Мы пишем “с согласия” потому, что нам неизвестны нормативные документы и публикации, в которых эта неизбежность подвергалась бы сомнению [10–13]. С целью провести анализ корреляции между газовыми взрывами и последующими за ними пожарами мы обратились к статистическим данным МЧС России. К сожалению, в них не оказалось информации о пожарах, возникающих при взрывах, поэтому эти сведения пришлось брать из СМИ [14]. Согласно им пожары возникают далеко не во всех газовых взрывах. Впрочем, это объективно видно и из фотоматериалов о происходивших взрывах (рис. 1 и 2).

В связи с этим резонно поставить вопрос, а, собственно, чем отличаются условия, при которых в одних

случаях пожар возникает, а в других — нет? Вопрос этот отнюдь не праздный. И вот почему. Разрушительная сила газового взрыва, безусловно, представляет собой очень опасный фактор, но взрыв, дополненный последующим пожаром, делает ситуацию еще опаснее. Понятно, что исключение пожара при газовом взрыве снизило бы уровень рисков. Между тем такая задача до сих пор ни у нас, ни за рубежом не ставилась и потому не решалась.

Гипотеза об особенностях газовых взрывов в бытовых помещениях. Исследования в рамках постав-



Рис. 1. Взрыв газа с пожаром в жилом доме в Волгограде (2015 г.)

Fig. 1. Gas explosion with the fire in a residential building in Volgograd (2015)



Рис. 2. Взрыв газа без пожара в Ростовской области (2019 г.)

Fig. 2. Gas explosion without the fire in Rostov region (2019)

Таблица 1. Сведения о газовых взрывах в России

Table 1. Information about gas explosions in Russia

Год Year	Количество взрывов по данным МЧС Number of explosions according to the Ministry of Emergency Situations		
	на объектах жилого и бытового назначения on residential and household objects	на других объектах on other premises	с последующим возгоранием with subsequent fire
2012	10	6	8
2013	6	2	2
2014	10	7	4
2015	8	4	4
2016	11	4	3
2017	18	0	5

ленной задачи открывают практически новое научное направление, формирующееся на стыке наук о процессах пожара и газового взрыва. Новизна заключается в особенностях условий, при которых развивается процесс взаимодействия пламени и горючих материалов в камере¹ и которые существенно отличаются от классической трактовки процесса возникновения и развития пожара. Рассмотрим их подробнее.

Во-первых, и это очевидно, время действия пламени, возникающего при взрыве, весьма ограничено. Это не позволяет напрямую связывать воспламенение горючих материалов при взрыве с их характеристиками, полученными в стандартных стационарных условиях. В подтверждение этого тезиса можно обратить внимание на результаты экспериментальных взрывов смеси газа *пропан – воздух* в камере объемом 10 м³ (рис. 3 и 4). На рис. 4 видно, что внутри камеры размещено оборудование, которое согласно нормативам может воспламеняться и гореть², однако, несмотря на реализацию в экспериментах около сотни взрывов, этого не произошло. Более того, оборудование сохранило свою работоспособность. И, похоже, оно еще долго будет работать.

Вернемся к экспериментальным взрывам в камере и объясним полученный результат. Очевидно, что поверхность экспериментального оборудования за время взрыва не успевает прогреться, а углеводороды, входящие в его состав, — разложиться и воспламениться.

Во-вторых, есть момент, не совсем очевидный, но весьма существенный, отличающийся особым характером взаимодействия газов при взрыве и горючих объектов, схема которого отражена на рис. 5. В их взаимодействии можно выделить четыре последовательных этапа, характеризующихся контактом ГМ с исходной газовой смесью (1-й), с фронтом пламени (2-й), с продуктами сгорания (3-й) и с наружным воздухом (4-й).

¹ Негорючие и трудногорючие вещества и материалы не рассматриваются.

² Поверхность корпуса вентилятора окрашена, его лопасти изготовлены из пластика, кабели и шланги имеют резиновую и пластиковую основу.



Рис. 3. Экспериментальный взрыв в камере $V = 10 \text{ м}^3$

Fig. 3. The experimental explosion in the chamber $V = 10 \text{ м}^3$



Рис. 4. Оборудование внутри камеры: вентилятор, кабели, шланги и устройство воспламенения

Fig. 4. Equipment inside the chamber: fan, cables, hoses and ignition device

На первом этапе ГМ взаимодействует с исходной смесью газов, которая незначительно³ прогревается в результате адиабатического сжатия в начальный момент взрыва, что исключает возможность относиться к нему как к пожароопасному. Коротко можно охарактеризовать этот этап так: есть кислород, но нет температуры.

На втором этапе мимо объекта проходит высокотемпературный фронт пламени. Ввиду того что

³ В помещении при наличии окна избыточное давление взрыва, как правило, не превышает 0,1 бар (10 кПа).

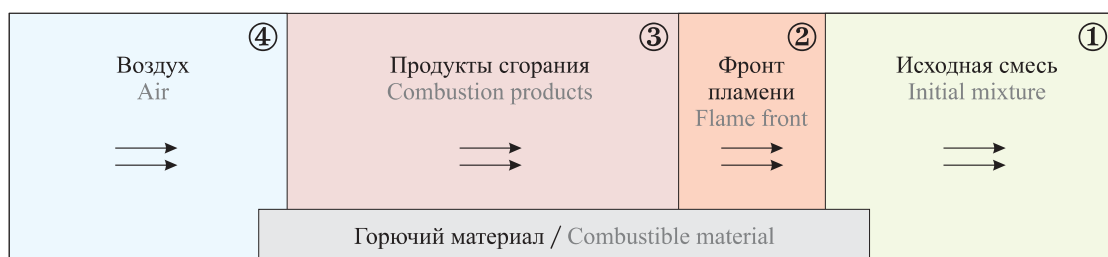


Рис. 5. Схема взаимодействия фронта пламени и ГМ

Fig. 5. Scheme of interaction of the flame front and combustible material

его ширина невелика и составляет в спокойном ламинарном пламени не превышает 1 мм, время его взаимодействия с объектом не превышает 3 мс. Для турбулентного пламени эта зона размыта, но время взаимодействия будет иметь тот же порядок. Отметим следующее: газ подготовлен к горению, в пламени он успевает разложиться на водород и углерод и сгореть. Теплосмкость ГМ на единицу объема намного выше, чем у газа, в результате чего он запаздывает с горением по сравнению с газом. Коротко этот этап можно охарактеризовать так: есть температура и кислород, но для ГМ кислорода остается столько, сколько он успеет “урвать” у газа.

На третьем этапе газы имеют высокую температуру, но в их атмосфере нет кислорода. Условия для возникновения горения в это время отсутствуют, а возникшее ранее пламя потухает, хотя пиролиз ГМ продолжается. Как известно, в этом процессе водород (и другие газы) из состава углеводорода улетучивается, а углерод остается, т. е. идет образование угля (сажи). Характеристика этапа: есть температура, но нет кислорода.

На четвертом этапе в камеру в результате имплозии поступает свежий воздух с кислородом. В этом случае ГМ, находящиеся в состоянии пиролиза, могут воспламениться. Этап характеризуется следующим: есть кислород и создаются условия для возможности воспламенения неостывших ГМ.

Из этого анализа вытекает, что условия воспламенения ГМ при газовых взрывах существенно отличаются от типично рассматриваемых, вследствие чего вопрос, воспламятся они или нет в процессе или в результате взрыва, остается открытым. Понятно, что для возникновения пожара необходимы три фактора: наличие ГМ, наличие кислорода и температура ГМ должна быть выше точки воспламенения. В отношении первого фактора естественно предположить, что в бытовом помещении всегда есть предметы, относящиеся к категории ГМ, по поводу второго — в камеру должен поступить наружный воздух, содержащий кислород. А вот что касается обязательности воспламенения ГМ при газовом взрыве при наличии второго и третьего факторов, то мы, учитывая статистику, должны поставить под сомнение этот тезис, иначе решение задачи возвращается к исходному состоянию.

Методика проведения исследования

Нестационарность и кратковременность тепловых процессов, происходящих при газовом взрыве, позволяют при анализе взаимодействия ГМ и пламени воспользоваться понятиями, введенными для случая анализа последствий воздействия на окружающую среду светового излучения при ядерных взрывах [15, 16]. Там использовалось такое понятие,

как тепловой импульс, определяемый как суммарное количество световой энергии, приходящееся на единицу площади, за все время действия источника. Несмотря на то что при ядерном взрыве источник светового потока можно представить в виде единичного источника, а при газовом взрыве источники рассредоточены по объему и присутствует в значительной мере конвективная составляющая теплового потока, понятие теплового импульса в нашей задаче оказалось вполне работоспособным.

Теоретически определить величину теплового импульса применительно к каждой точке помещения весьма проблематично, более того, это практически неразрешимая задача. Однако экспериментально это можно сделать с достаточной уверенностью, хотя и весьма приблизительно. Для этого необходимо поместить в исследуемую точку ГМ с известной реакцией на тепловой импульс, которая должна быть определена по стандартным методикам. Используя эти данные совместно с результатами такого же воздействия теплового импульса на ГМ при взрыве, можно судить о пожароопасности в окрестности ГМ. Размещение ГМ в объеме помещения может способствовать решению поставленной задачи о распределении в нем тепловых импульсов.

Замена этого способа измерением температуры и скорости потока⁴ в рассматриваемой точке не оправдана по двум причинам: во-первых, измерения трудоемки, а во-вторых, при расчете теплового потока с учетом этих параметров точность оценки вряд ли будет выше, чем при прямом варианте, т. е. с использованием ГМ.

Краткий анализ испытаний горючих материалов на воспламеняемость

Для выбора ГМ для эксперимента рассмотрены условия воспламенения ГМ, наиболее характерных для бытовых помещений: древесины, обоев, напольных покрытий и ткани. Кстати говоря, их пожарные свойства согласно современным требованиям непременно исследуются в специализированных лабораториях. Достаточно подробно исследованы свойства древесины. Ограничимся кратким анализом результатов, полученных и опубликованных в России и за рубежом [17–24].

Древесина. Свойства древесины, что вполне естественно, с точки зрения пожарной опасности различаются в зависимости от породы дерева, но значения показателей пожарной опасности вполне сравнимы. В качестве примера приведены результаты исследования пиролиза опытных образцов древесины (рис. 6–8), в частности такого экзотического дерева, как ваншан (Вьетнам). Авторами выявлено,

⁴ Тепловой поток зависит от многих других факторов.

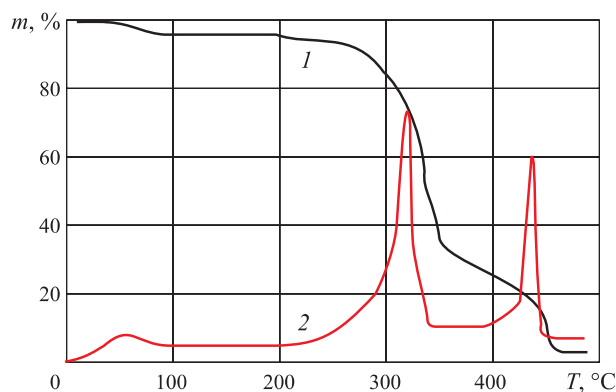


Рис. 6. Интегральная (1) и дифференциальная (2) кривые изменения массы m образца древесины ваншам

Fig. 6. Integral (1) and differential (2) weight m change curves of a wood sample

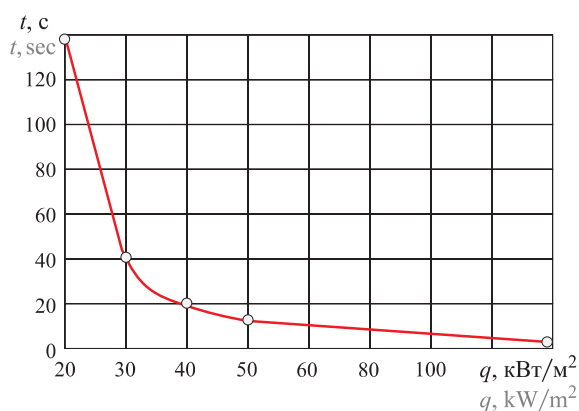


Рис. 7. Зависимость времени воспламенения сосны t от плотности теплового потока q

Fig. 7. Relationship of the time of ignition of the pine t on the specific heat flux q

что характер пиролиза древесины мало зависит от атмосферы (азотной или воздушной), в которой проходит этот процесс. На участке нагрева от нормальной температуры до 150 °С образец теряет часть массы за счет испарения абсорбированной влаги. На участке от 150 до 240 °С начинается коксование материала на поверхности образца, а выделяющиеся газы готовы к горению при наличии внешнего источника. При температурах⁵ свыше 240 °С коксование становится интенсивным, что приводит к значительной потере массы материалом образца. Особенно активно этот процесс протекает при температуре около 320 °С, после чего несколько замедляется. При дальнейшем нагреве смесь газов может самовоспламениться.

На рис. 7 приведены данные по времени воспламенения древесины сосны в зависимости от величины потока лучистой энергии, из которых видно, что найденная зависимость имеет характер, близкий

⁵ В публикациях наблюдается значительный разброс данных для разных типов древесины.

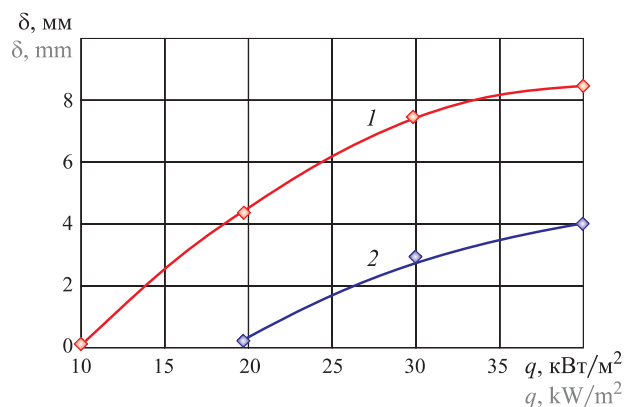


Рис. 8. Зависимость $\delta = \delta(q)$ при пламенном горении в течение 5 мин: 1 — сосна; 2 — дуб; δ — толщина коксового слоя

Fig. 8. Relationship $\delta = \delta(q)$ during flame burning for 5 min: 1 — pine; 2 — oak; δ — depth of the coke layer

к обратной пропорциональности. Известно также, что со временем в результате пиролиза толщина слоя кокса на поверхности ГМ возрастает. На рис. 8 приведена зависимость толщины такого слоя от величины потока энергии $\delta = \delta(q)$ при пламенном горении в течение 5 мин. На графике виден значительный разброс данных для разных пород древесины.

Что касается остальных трех из перечисленных выше ГМ, то нам неизвестны аналитические статьи по их пожароопасным свойствам, но есть результаты их испытаний в Испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве при НИУ МГСУ. Отметим, что для бытовых помещений жилых домов нормативные документы никак не ограничивают применение типов тканей и обоев, имеющих свойства от КМ0 до КМ5, т. е. от слабогорючих до сильногорючих. Жесткие ограничения действуют для помещений, где возможно пребывание большого числа людей, в том числе в детских садах, учебных заведениях, холлах лестничных площадок, лифтовых, залах и др. В них допустимо применение обоев только типов КМ0, КМ1 и в отдельных случаях КМ2. Типы КМ4 и КМ5 не рассматриваются как пожаробезопасные.

Обои. В качестве примера приведем результаты испытаний обоев с виниловым покрытием на нетканой (флизелиновой) основе Digifort NW, имеющих группу воспламеняемости В2, высокую дымообразующую способность, низкую токсичность, группу горючести Г2 (рис. 9). При испытаниях на образец обоев воздействовали открытым пламенем горелки в течение 10 мин.

Напольные покрытия по своей природе характеризуются не меньшим разнообразием, чем обои. При испытаниях одного из образцов напольного покрытия марки Falquon с твердополимерной основой (состав: 75 % мел + 25 % поливинилхлорид) без применения пластификаторов, толщиной 5 мм, плот-



Рис. 9. Вид образцов обоев на флизелиновой основе после испытания

Fig. 9. Wallpaper samples on a non-woven base after testing

ностью 1514 кг/м^3 получено, что время с момента начала теплового воздействия на образец до возникновения устойчивого пламенного горения при плотности теплового потока 30 кВт/м^2 составляет 96 с ; наблюдается умеренное дымообразование; по группе по распространению пламени образец относится к РП1, т. е. к не распространяющим его.

Бумага. В табл. 2 приведены результаты испытаний образца бумаги на воспламеняемость на установке по стандартной методике без включения системы принудительного зажигания. Испытаниям подвергали бумагу “акварельную” (производитель “Лилия-Холдинг-Полиграфия”, г. Тверь), имеющую плотность 800 кг/м^3 , теплопроводность $0,14 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, теплоемкость $1090 \dots 1500 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{K)}$, $\delta = 0,25 \text{ мм}$. В результате воздействия пламени при взрыве происходило коксование ее поверхности и потеря светлоты⁶, степень которой оценивалась после обработки стандартными методами сканирования и компьютерной программой *Adobe Photoshop*.

В ходе эксперимента в каждом опыте после калибровки была установлена плотность теплового потока $q = 50 \text{ кВт/м}^2$, время воздействия которого на бумагу изменялось от опыта к опыту. В табл. 2 через Q_3 обозначен тепловой импульс, направленный от излучателя, а через d — степень повреждения образца:

$$Q_3 = qt; \quad (2)$$

$$d = \frac{100 - S}{100 - S_{\text{св}}}, \quad (3)$$

где t — время проведения опыта, с;

S — степень светлоты образца после облучения, %;

⁶ Термин, принятый в светотехнике.

$S_{\text{св}}$ — степень светлоты, при которой происходит самовоспламенение и полное разрушение образца, %.

В данном случае термин “степень повреждения” расходится с известным толкованием, но тем не менее он также связан с воздействием теплового потока на образец и его разрушением. Значения степени повреждения меняются от 0 до 1, т. е. от “без видимых следов повреждения” при $d = 0$ и до полного разрушения со сгоранием при $d = 1$. В табл. 2 в последней ячейке (при $d = 1$) приведена фотография индикатора после выгорания при испытании во взрывной камере.

Отметим, что на всех образцах степень повреждения была практически одинаковой с обеих сторон бумаги, хотя понятно, что воздействие теплового импульса было только с одной стороны. Это свидетельствует о том, что при расчетах прогрева листов бумаги такой толщины можно считать коэффициент теплопроводности бумаги бесконечно большим и принимать температуру образца одинаковой по всей толщине, что значительно упрощает тепловые расчеты.

На рис. 10 приведен график, демонстрирующий данные таблицы. На графике можно отметить две ступени, очень похожие (в перевернутом виде) на ступени, приведенные на рис. 6. Несмотря на то что экспериментальные данные получены при различных условиях и разных методиках обработки данных, можно провести не только качественные сравнения, но и некоторые количественные. Так, считая в определенной мере близкими характеристики дерева и бумаги, можно ожидать, что площадка на рис. 10 при $Q_3 > 300 \text{ кДж/м}^2$, когда идет активное коксование бумаги, соответствует резкому уменьшению массы деревянного образца на рис. 6 при $T > 240^\circ\text{C}$. С натяжкой можно считать, что активное коксование бумаги начинается при температурах выше 220°C , а самовоспламенение — при 320°C .

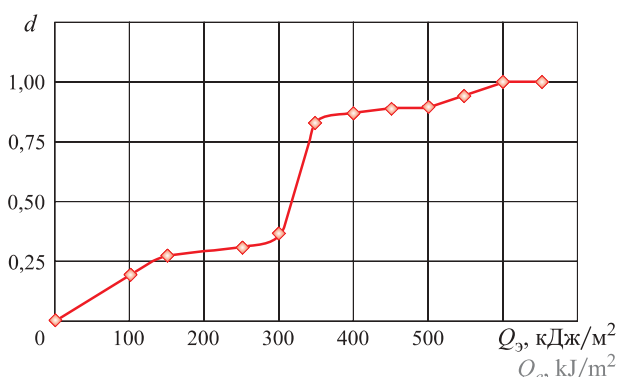
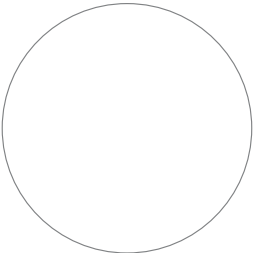
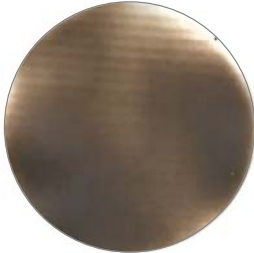

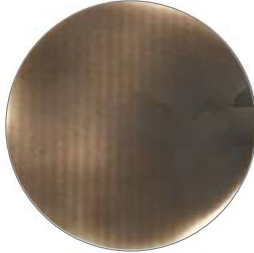


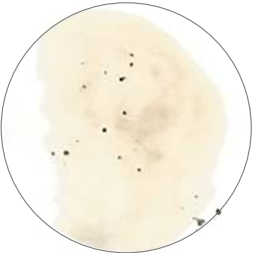
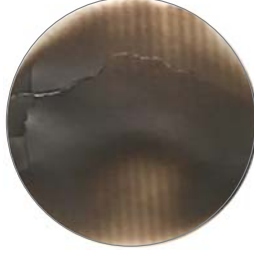


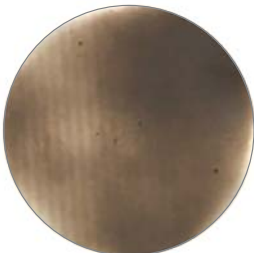



Рис. 10. Зависимость степени разрушения бумаги от теплового импульса Q_3

Fig. 10. Relationship of the degree of destruction of the paper on the value of the heat pulse Q_3

Таблица 2. Результаты испытаний образца бумаги / Table 2. Paper sample test results

Q_3 , кДж/м Q_e , kJ/m ²	d	Вид образца Sample view	Q_3 , кДж/м ² Q_e , kJ/m ²	d	Вид образца Sample view
0	0		400	0,87	
100	0,20		450	0,88	
150	0,27		500	0,89	
250	0,31		550	0,95	
300	0,37		600	0,97	
350	0,83		> 600	1,00	

Вполне естественно этим графиком пользоваться для оценки величины теплового импульса по степени повреждения бумаги.

Эксперименты

Для проведения взрыва использовалась взрывная камера объемом 10 м^3 кубической формы (см. рис. 3 и 4). Перед взрывом в оконном проеме было закреплено двустворчатое окно (рис. 11). Камеру заполняли пропаном, исходя из расчета образования стехиометрического состава; смесь перемешивали вентилятором. Зажигание смеси производилось по центру камеры. Методика проведения опытных взрывов приведена в работах [25, 26].

При испытаниях использовались специально разработанные индикаторы (рис. 12). “Чувствительным” элементом была бумага, воспламенительные свойства которой представлены в табл. 2. Индикатор состоит из кольца, на которое наклеивается контрольный лист бумаги, и скобы, обеспечивающей крепление индикатора внутри камеры. Весьма важной особенностью бумаги являлся тот факт, что в опытах лист повреждался полностью не на всех индикаторах.

Было проведено два эксперимента с закрепленными внутри камеры 35 индикаторами, схема расположения которых представлена на рис. 13.

Первый эксперимент. Определялось распределение тепловых потоков по объему камеры во время

взрыва (см. рис. 13). Индикаторы были расставлены по пяти сечениям, перпендикулярным оси камеры Z. Сравнивая цвета выделенных контуров, очерченных вокруг индикаторов, и бумаги в табл. 2, можно оценить величину тепловых импульсов, которая колебалась от 150 до 600 кДж/м^2 и более. Самыми безопасными местами оказались углы камеры, в том числе в ее передней и задней частях, а наиболее опасными — по оси камеры от ее центра до выхода и в ее верхних частях.

Очевидно, этому есть две причины. Во-первых, пламя распространяется от центра камеры во все стороны и прежде всего к выходу из нее, поэтому время взаимодействия продуктов сгорания и ГМ в области между центром и выходом наибольшее. Дополним этот тезис уточнением: пламя распространяется вверх быстрее, чем вниз, в силу действия сил Архимеда и “всплытия” горячих газов в среде холодного, поэтому в верхних точках в камере величина тепловых потоков больше [27]. Во-вторых, по оси камеры от центра до выхода наблюдаются наибольшие скорости движения газа, что делает весьма существенной конвективную составляющую теплопередачи от газов к ГМ. К углам камеры пламя приходит в последнюю очередь, когда горение в ней заканчивается и давление начинает падать. В это время становится близким этап имплозии, в течение которого наружный воздух поступает в камеру и остужает находящийся в ней газ. Собственно говоря, результаты, полученные в эксперименте, не противоречат здравому смыслу.

Представляет интерес еще одно наблюдение. На индикаторах по месту наклеивания бумаги на стальной обод (см. рис. 12) практически отсутствуют следы коксования, что можно объяснить следующим: теплоемкость металла достаточна для того, чтобы не нагреться самому и не дать нагреться образцу бумаги через клеющую прослойку. Заметим, что ширина незакоксованного кольца на бумаге больше диаметра проволоки (сравните: $6...10 \text{ мм}$ против 3 мм). Эффект влияния проволоки на бумагу при взрыве подтверждается результатами испытания обоев (см. рис. 9), которые под воздействием от-



Рис. 11. Распашное окно, вставленное в проем камеры
Fig. 11. Hinged window inserted into the chamber opening



Рис. 12. Индикатор теплового импульса: а — корпус индикатора, кольцо диаметром 90 мм из проволоки диаметром 2,5 мм; б — бумага прямоугольной формы, наклеенная на кольцо; в — вид индикатора после взрыва

Fig. 12. Heat impulse indicator: а — indicator structure, ring diameter 90 mm, wire diameter 2.5 mm; б — rectangular paper glued to the ring; в — indicator view after explosion

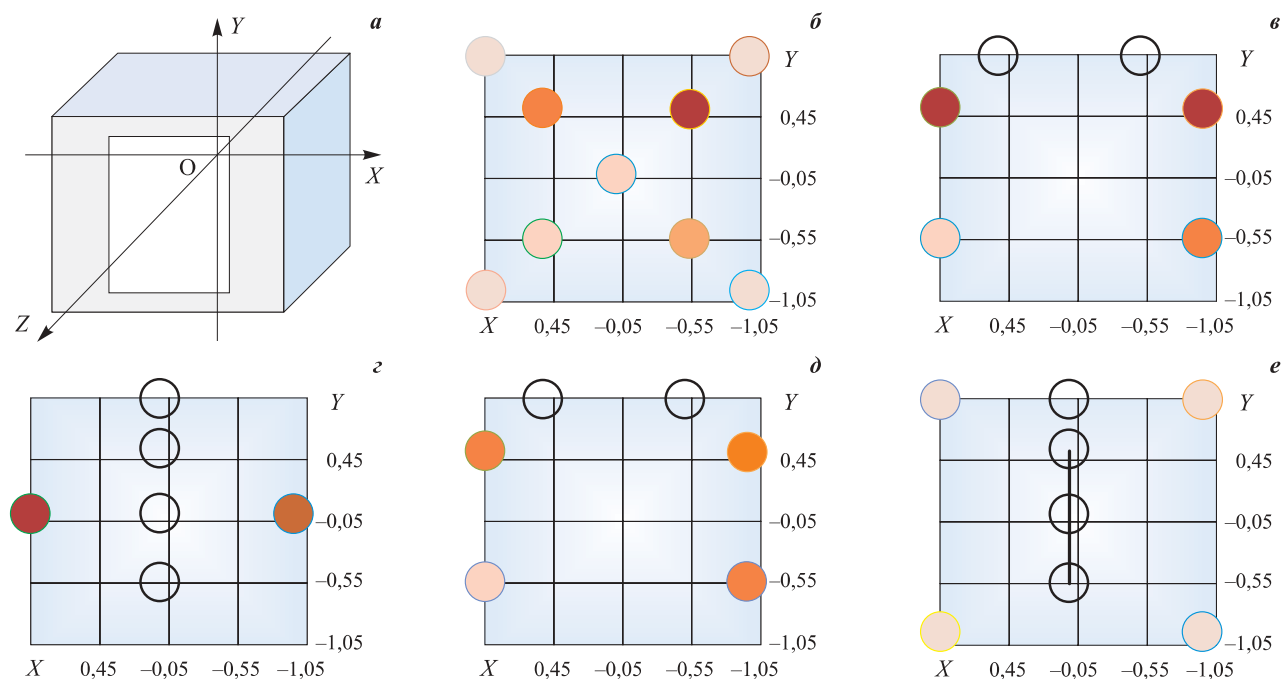


Рис. 13. Центр и начало отсчета системы координат (а) и схема расположения индикаторов теплового импульса (б–е): б — $z = 0,10$ м (у задней стенки); в — $z = 0,53$ м; г — $z = 1,05$ м (близко к центру камеры); д — $z = 1,58$ м; е — $z = 2,00$ м (у выхода из камеры)

Fig. 13. Center and origin of the coordinate system (a) and the layout of heat impulse indicators (b–e): b — $z = 0,10$ m (indicators at the rear wall); v — $z = 0,53$ m; g — $z = 1,05$ m (close to the center of the chamber); d — $z = 1,58$ m; e — $z = 2,00$ m (at the exit from the chamber)

крытого пламени горят с “неохотой”, а без него горение вовсе прекращается.

Второй эксперимент. Решалась задача определения момента воспламенения бумаги на индикаторе при газовом взрыве. Для этого внутри камеры была установлена видеочкамера типа XiaomiYi Action Camera (в чехле), направленная на один из индикаторов, который по имеющемуся опыту ожидаемо должен был воспламениться. В проеме камеры было установлено распашное окно реальных размеров (см. рис. 11), створки которого при газовом взрыве раскрывались нараспашку. Полученный при взрыве ход давления показан на рис. 14, а кадры с видеочкамеры — на рис. 15. Показания видеочкамеры и запись давления взрыва синхронизированы.

На кадрах в интервале от 5 до 124 мс видно, как развивается фронт пламени, имеющий сферическую форму. В верхней части кадра наблюдается белый прямоугольник контрольной бумаги индикатора, к которому на 124-й мс подходит фронт пламени, уже в довольно турбулизированном виде. На 250-й мс, когда все еще продолжается горение и окно уже открыто (см. рис. 14), белый лист бумаги остается целым. К 333-й мс в камере активное горение практически заканчивается и идет догорание смеси в ее углах, давление становится ниже атмосферного (несмотря на колебания), наступает этап имплозии. К 417-й мс догорают последние очаги газовой смеси,

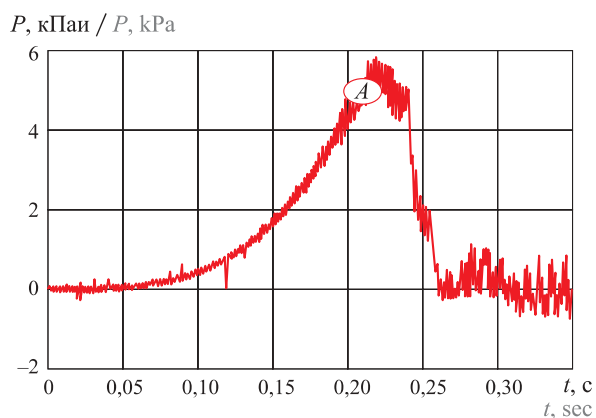


Рис. 14. Ход кривой давления при взрыве: А — момент вскрытия окна

Fig. 14. Course of the pressure curve during the explosion: А — the moment the window was opened

в камере становится темно. Далее по времени в камере газ становится прозрачным, горение полностью прекращается, а к моменту 833 мс вспыхивает бумага индикатора.

Из рис. 15 отчетливо видно, что бумага на индикаторе не воспламеняется ни во фронте пламени, ни в окружении горячих продуктов сгорания, а загорается только с наступлением этапа имплозии, с поступлением наружного воздуха в камеру, что подтверждает гипотезу об условиях возгорания ГМ при газовых взрывах в помещении.

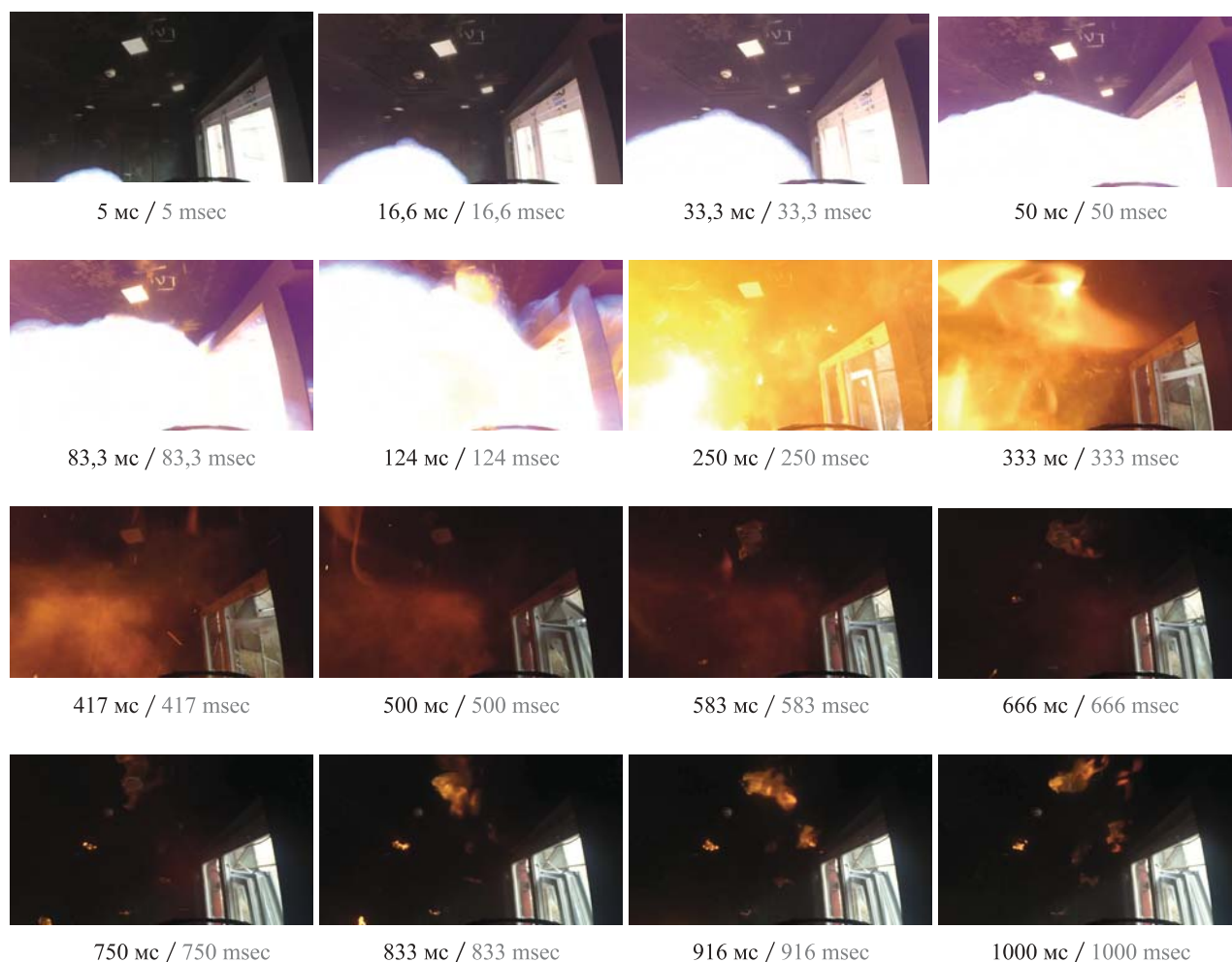


Рис. 15. Избранные кадры с видеокamеры, отражающие процесс взрыва во втором эксперименте

Fig. 15. Selected frames of the testimony of the camera

По окончании опыта была проверена работоспособность оборудования, находящегося внутри камеры: вентилятора типа ВО серии 02, резиновых шлангов, устройства розжига, проводов и др. В результате установлено, что оборудование не пострадало и может быть использовано в последующих опытах.

Выводы

1. При газовых взрывах в бытовых помещениях пожары возникают не всегда, а только в половине случаев, несмотря на то что практически всегда есть горючие материалы (твёрдого типа), а сам взрыв является мощным тепловым импульсом.

2. При газовом взрыве в камере, близкой по своему масштабу к реальным бытовым помещениям, было установлено, что наиболее пожароопасными зонами помещения являются части его объема от центра вверх и до оконного проема, где значения теплового импульса достигали 600 кДж/м^2 и выше. К наименее опасным относятся углы и объемы у

всех стенок (за исключением верхней), в которых термический импульс не превышает 300 кДж/м^2 .

3. Бумага толщиной $0,25 \text{ мм}$ воспламеняется только в зонах помещения, где тепловые импульсы имели значение более 600 кДж/м^2 , после завершения активной фазы взрыва, спада давления и наступления этапа имплозии, т. е. при поступлении наружного воздуха в камеру.

4. Бумага в местах склейки с проволокой диаметром $2,5 \text{ мм}$ значительно меньше подвержена воздействию теплового импульса. Оборудование, расположенное в камере, включая обычный вентилятор, шланги и провода, остаются работоспособными.

5. Подтверждена гипотеза о том, что при газовом взрыве в зоне пламени и продуктов сгорания может происходить только пиролиз горючих материалов, а их воспламенение наступает на этапе имплозии и при поступлении наружного воздуха в помещение. И только в том случае, если теплоемкость ГМ сравнительно мала, и они успевают прогреться до температуры выше температуры воспламенения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольченко А. Я., Бушманов С. А. Количественная оценка величины пожарного риска // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2010. — Т. 19, № 6. — С. 27–29.
2. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Вагнер П. Человечество и пожары. — М. : ИПЦ “Маска”, 2007. — 142 с.
3. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Григорьева М. П. Анализ основных пожарных рисков в странах мира и в России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 2. — С. 72–80. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.72-80.
4. America Burning: The Report of the National Commission on Fire Prevention and Control / Neville A. E., Tipton H. D., Bland R. E. (eds.). — Washington : U. S. Government Printing Office, 1973. — 177 p.
5. America Burning Revisited. National Workshop — Tyson’s Corner, Virginia. — Washington : FEMA, 1987. — 141 p.
6. Hylton J. G. Haynes. Fire loss in the United States during 2015. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2016. — 50 p.
7. Fei Ren, Longhua Hu, Xiaolei Zhang, Xiepeng Sun, Jianping Zhang, Michael Delichatsios. Experimental study of transitional behavior of fully developed under-ventilated compartment fire and associated facade flame height evolution // Combustion and Flame. — 2019. — Vol. 208. — P. 235–245. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.003.
8. Santner J., Goldsborough S. S. Hot-spot induced mild ignition: Numerical simulation and scaling analysis // Combustion and Flame. — 2019. — Vol. 209. — P. 41–62. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.017.
9. Report on NC gas explosion recommends hiring more FFs. 19 November 2019. URL: <https://www.fire-rescue1.com/recruitment/articles/report-on-nc-gas-explosion-recommends-hiring-more-ffs-1TUbZv72tKPFqpad/> (дата обращения: 16.12.2019).
10. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с изм. № 1). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 13.12.2019).
11. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон РФ от 22.07.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 27.12.2018). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 16.12.2019).
12. BS EN 14797:2006. Explosion venting devices. — BSI, 2007. — 32 p.
13. NFPA 68:2018. Standard on explosion protection by deflagration venting. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2018.
14. Мордасова Инна. Взрывов бытового газа в СССР было в разы меньше, чем в современной России. URL: <https://pronedra.ru/pochemu-v-sssr-vzryvov-bytovogo-gaza-bylo-v-razy-menshe-363956-pid-n.html> (дата обращения: 16.12.2019).
15. Адушкин В. В., Горбенко Б. З., Овсянников Г. А., Разоренов А. А. О методах измерения светового излучения воздушного ядерного взрыва // Ядерные испытания. Кн. 1: Ядерные испытания в Арктике. — М. : Карпуш, 2006. — Т. 2. — С. 246–262. URL: http://elbib.biblioatom.ru/text/yadernye-ispytaniya_kn1_t2_2006/go,246/ (дата обращения: 13.12.2019).
16. Griffith C. Atomic Archive: Enhanced Edition. — San Diego, California : AJ Software & Multimedia, 2002 (CD-ROM).
17. Серков Б. Б., Сивенков А. Б., Тхань Б. Д., Асеева Р. М. Термическое разложение древесины тропических пород // Лесной вестник. — 2005. — № 2. — С. 70–76.
18. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 19–32.
19. Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Чистов Ю. С., Габидуллин А. Ф. Пожарная опасность зажигания целлюлозных материалов тепловым излучением // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Vol. 21, № 8. — С. 36–41.
20. Гришин А. М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2010. — № 2(10). — С. 60–70.
21. Merzhanov A. G., Averson A. E. The present state of the thermal ignition theory: An invited review // Combustion and Flame. — 1971. — Vol. 16, Issue 1. — P. 89–124. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80015-9.
22. Gongxin Dai, Kaige Wang, Guanyu Wang, Shurong Wang. Initial pyrolysis mechanism of cellulose revealed by in-situ DRIFT analysis and theoretical calculation // Combustion and Flame. — 2019. — Vol. 208. — P. 273–280. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.009.

23. Wasan S. R., Rauwoens P., Vierendeels J., Merci B. An enthalpy-based pyrolysis model for charring and non-charring materials in case of fire // *Combustion and Flame*. — 2010. — Vol. 157, Issue 4. — P. 715–734. DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.007.
24. Vermesi I., DiDomizio M. J., Richter F., Weckman E. J., Rein G. Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation: Experiments and a-priori predictions // *Fire Safety Journal*. — 2017. — Vol. 91. — P. 218–225. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.081.
25. Поландов Ю. X., Добриков С. A., Кукин Д. A. Результаты испытаний легкосбрасываемых конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. — 2017. — Т. 26, № 8. — С. 5–14. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14.
26. Polandov Yu., Korolchenko A., Dobrikov S. Gas explosion in a room with a window and passage to an adjacent room // *MATEC Web of Conferences*. — 2016. — Vol. 86. — Article No. 04031. — 7 p. DOI: 10.1051/mateconf/20168604031.
27. Xiao H., Makarov D., Sun J., Molkov V. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct // *Combustion and Flame*. — 2012. — Vol. 159, Issue 4. — P. 1523–1538. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.12.003.

REFERENCES

1. A. Ya. Korolchenko, S. A. Bushmanov. Quantitative assessment of fire risk value. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2010, vol. 19, no. 6, pp. 27–29 (in Russian).
2. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, P. Wagner. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2007. 142 p. (in Russian).
3. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, M. P. Grigoryeva. Major fire risks analysis in the countries of the world and in Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 72–80 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.72-80.
4. A. E. Neville, H. D. Tipton, R. E. Bland (eds.). *America Burning*. The Report of the National Commission on Fire Prevention and Control. Washington, U. S. Government Printing Office, 1973. 177 p.
5. *America Burning Revisited. National Workshop — Tyson's Corner, Virginia*. Washington, FEMA, 1987. 141 p.
6. Hylton J. G. Haynes. *Fire loss in the United States during 2015*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2016. 50 p.
7. Fei Ren, Longhua Hu, Xiaolei Zhang, Xiepeng Sun, Jianping Zhang, Michael Delichatsios. Experimental study of transitional behavior of fully developed under-ventilated compartment fire and associated facade flame height evolution. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 208, pp. 235–245. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.003.
8. J. Santner, S. S. Goldsborough. Hot-spot induced mild ignition: Numerical simulation and scaling analysis. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 209, pp. 41–62. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.017.
9. *Report on NC gas explosion recommends hiring more FFs*. 19 November 2019. Available at: <https://www.firerescue1.com/recruitment/articles/report-on-nc-gas-explosion-recommends-hiring-more-ffs-ITUbZv72tKPFqpad/> (Accessed 16 December 2019).
10. Set of rules 12.13130.2009. *Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard (with changes No. 1)* (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (Accessed 13 December 2019).
11. *Technical regulations for fire safety requirements*. Federal Law on 22.07.2008 No. 123 (ed. 27.12.2018) (in Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (Accessed 16 December 2019).
12. BS EN 14797:2006. *Explosion venting devices*. BSI, 2007. 32 p.
13. NFPA 68:2018. *Standard on explosion protection by deflagration venting*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2018.
14. Inna Mordasova. *Household gas explosions in the USSR were many times less than in modern Russia* (in Russian). Available at: <https://pronedra.ru/pochemu-v-sssr-vzryvov-bytovogo-gaza-bylo-v-razy-menshe-363956-pid-n.html> (Accessed 16 December 2019).
15. V. V. Adushkin, B. Z. Gorbenco, G. A. Ovsyannikov, A. A. Razorenov. About the measuring methods of light radiation of air nuclear explosion. In: *Yadernyye ispytaniya. Kniga 1: Yadernyye ispytaniya v Arktike* [Nuclear tests. Book 1: Arctic nuclear tests]. Moscow, Kartush Publ., 2006, vol. 2, pp. 246–262 (in Russian). Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/yadernye-ispytaniya_kn1_t2_2006/go,246/ (Accessed 13 December 2019).
16. C. Griffith. *Atomic Archive: Enhanced Edition*. San Diego, California, AJ Software & Multimedia, 2002 (CD-ROM).

17. B. B. Serkov, A. B. Sivenkov, B. D. Thanh, R. M. Aseeva. Thermal decomposition of some tropical wood species. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2005, no. 2, pp. 70–76 (in Russian).
18. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. Combustion and fire safety of wooden materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 19–32 (in Russian).
19. R. Sh. Enaleev, E. Sh. Telyakov, Yu. S. Chistov, A. F. Gabidullin. Fire danger ignition of cellulose materials by heat radiation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 8, pp. 36–41 (in Russian).
20. A. M. Grishin. General physical-mathematical model of ignition and burning of wood. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika / Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2010, no. 2(10), pp. 60–70 (in Russian).
21. A. G. Merzhanov, A. E. Averson. The present state of the thermal ignition theory: An invited review. *Combustion and Flame*, 1971, vol. 16, issue 1, pp. 89–124. DOI: 10.1016/s0010-2180(71)80015-9.
22. Gongxin Dai, Kaige Wang, Guanyu Wang, Shurong Wang. Initial pyrolysis mechanism of cellulose revealed by in-situ DRIFT analysis and theoretical calculation. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 208, pp. 273–280. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.009.
23. S. R. Wasan, P. Rauwoens, J. Vierendeels, B. Merci. An enthalpy-based pyrolysis model for charring and non-charring materials in case of fire. *Combustion and Flame*, 2010, vol. 157, issue 4, pp. 715–734. DOI: 10.1016/j.combustflame.2009.12.007.
24. I. Vermesi, M. J. DiDomizio, F. Richter, E. J. Weckman, G. Rein. Pyrolysis and spontaneous ignition of wood under transient irradiation: Experiments and a-priori predictions. *Fire Safety Journal*, 2017, vol. 91, pp. 218–225. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.081.
25. Yu. Kh. Polandov, S. A. Dobrikov, D. A. Kukin. Results of tests pressure-relief panels. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 8, pp. 5–14 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.5-14.
26. Yu. Polandov, A. Korolchenko, S. Dobrikov. Gas explosion in a room with a window and passage to an adjacent room. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 86, article no. 04031. 7 p. DOI: 10.1051/matec-conf/20168604031.
27. H. Xiao, D. Makarov, J. Sun, V. Molkov. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct. *Combustion and Flame*, 2012, vol. 159, issue 4, pp. 1523–1538. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.12.003.

Поступила 20.12.2019, после доработки 10.01.2020; принята к публикации 24.01.2020

Received 20 December 2019; Received in revised form 10 January 2020; Accepted 24 January 2020

Информация об авторах

ПОЛАНДОВ Юрий Христофорович, д-р техн. наук, профессор, профессор-консультант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 55538573200; ORCID: 0000-0003-2983-6023; e-mail: polandov@yandex.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 55946060600; Researcher ID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ЕВИЧ Андрей Андреевич, заместитель руководителя испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 57207247952; ORCID: 0000-0003-4053-6283; e-mail: evich.andrey25@gmail.com

Information about the authors

Yurii Kh. POLANDOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor-Consultant of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; Author ID: 55538573200; ORCID: 0000-0003-2983-6023; e-mail: polandov@yandex.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; Author ID: 55946060600; Researcher ID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Andrey A. EVICH, Deputy Head of Testing Laboratory of Institute of Integrated Safety in Construction, Postgraduate Student Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; Author ID: 57207247952; ORCID: 0000-0003-4053-6283; e-mail: evich.andrey25@gmail.com