

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 3. С. 17–30
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(3):17-30

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.343.7

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30>

Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести

Иван Ардашевич Болодьян¹, Леонид Петрович Вогман¹,
Дмитрий Александрович Корольченко²✉

¹ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В различных отраслях народного хозяйства применяется герметичное оборудование (далее — гермокамера), в котором используется обогащенная кислородом атмосфера (в ряде случаев в условиях с изменяющимся давлением). Показано, что главной причиной пожаров в гермокамерах являлось нерегламентированное применение изделий электрооборудования, а также горючих веществ и материалов на основе органических соединений, входящих в состав применяемых в гермокамерах материалов.

Цель. Поиск способов снижения горючести материалов, применяемых в гермокамерах, и исследование параметров пожарной опасности гермокамер с повышенным содержанием кислорода и повышенным давлением.

Задачи. Определение граничных условий применения материалов при повышенных значениях температуры, содержания кислорода и давления, анализ результатов экспериментальных исследований горючести материалов, применяемых в гермокамерах.

Методы исследования. Исследование характеристик процесса горения неметаллических материалов при повышенном давлении проводили на оригинальной установке, представляющей собой сосуд из нержавеющей стали высотой 750 мм и внутренним диаметром 155 мм. Для зажигания образца использовали спираль из нихромовой проволоки. Давление фиксировали при помощи манометра.

Результаты и их обсуждение. В результате экспериментальных исследований пожарной опасности строительных и конструкционных материалов в обогащенных кислородом средах и при повышенном давлении были определены пути повышения предельной концентрации кислорода (ПКК) и снижения горючести материалов: применение теплоотводящей поверхности, негорючей оболочки; введение ингибиторов в их состав и структуру; поверхностная обработка различными огнезащитными составами и пропитками. При исследованиях параметров пожарной опасности (скорость распространения пламени, теплота сгорания, температура самовоспламенения) материалов в условиях изменения состава азотно-кислородной атмосферы и давления получено, что при повышенных давлениях ПКК для всех материалов снижается.

Выводы. Установлено, что предельная концентрация кислорода зависит от геометрических размеров образца, а также от скорости газового потока. При повышенных давлениях ПКК для всех материалов снижается. Наличие теплоотводящей поверхности также ведет к повышению ПКК, которая возрастает с увеличением толщины подложки и уменьшением толщины материала на ней. Для материалов, не содержащих веществ, ингибирующих реакцию горения, характерно снижение значения ПКК при увеличении в макромолекуле полимера количества атомов водорода.

Ключевые слова: конструкционный материал; азотно-кислородный поток; пожарная опасность строительных материалов; токсичность продуктов горения; горение полимеров

Для цитирования: Болодьян И.А., Вогман Л.П., Корольченко Д.А. Экспериментально-аналитические исследования пожарной опасности материалов, применяемых в оборудовании с обогащенными кислородом средами при повышенных давлениях, и пути снижения их горючести // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 3. С. 17–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03.17-30

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Experimental and analytical studies of the fire hazard of materials used in equipment with oxygen-enriched media and ways to reduce their flammability

Ivan A. Bolodyan¹, Leonid P. Vogman¹, Dmitriy A. Korolchenko²✉

¹All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Sealed equipment (hereinafter referred to as hermetic chambers) is used in various branches of economy. Atmospheres enriched with oxygen (in some cases under variable pressure conditions) are used. It was shown that the main reason of the fires in the pressurized chambers was the unregulated use of the electrical equipment, as well as combustible substances and materials on the basis of organic compounds included in the materials used in the pressurized chambers.

Objective. To find ways to decrease combustibility of materials used in pressurized chambers and to study fire risk parameters of pressurized chambers with high oxygen content and increased pressure.

Objectives. To determine the boundary conditions of applying materials with increased values of temperature, oxygen content and pressure and analyze the results of experimental studies of combustibility of materials used in sealed chambers.

Research methods. Investigation of the characteristics of the combustion process of non-metallic materials under increased pressure was carried out on an original setup represented by a stainless steel vessel with a height of 750 mm and an inner diameter of 155 mm. A spiral of nichrome wire was used to ignite the sample. The pressure was fixed with a manometer.

Results and their discussion. As a result of experimental research of fire hazard of construction and construction materials in oxygen-enriched media and under increased pressure the ways of increasing the oxygen concentration limit (OCL) and reduction of combustibility of materials were determined: application of heat-removing surface, incombustible shell; putting inhibitors in their composition and structure; surface treatment with different fire protective compositions and impregnations. When studying the parameters of fire hazard (flame propagation velocity, heat of combustion, autoignition temperature) of materials under the conditions of changes in the composition of nitrogen-oxygen atmosphere and pressure, it was found that the OCL for all materials decreases at higher pressures.

Conclusions. It is found that the limiting oxygen concentration depends on the geometrical dimensions of the sample, as well as on the speed of the gas flow. At higher pressures the OCL for all the materials decreases. The presence of a heat-removing surface also leads to higher OCL, which increases with increasing substrate thickness and decreasing thickness of the material on it. For materials not containing substances that inhibit the combustion reaction, a decrease in the LOC value with an increase in the number of hydrogen atoms in the polymer macromolecule is characteristic.

Keywords: construction material; nitrogen-oxygen flow; fire hazard of construction materials; toxicity of combustion products; polymer combustion

For citation: Bolodyan I.A., Vogman L.P., Korolchenko D.A. Experimental and analytical studies of the fire hazard of materials used in equipment with oxygen-enriched media and ways to reduce their flammability. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(3):17–30. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.03. 17–30 (rus).

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: ikbs@mgsu.ru

Введение

В различных отраслях народного хозяйства (медицина, космическая, авиационная и глубоководная техника) применяется герметичное оборудование (далее — гермокамера), в котором используется обогащенная кислородом атмосфера (в ряде случаев в условиях с изменяющимся давлением). Содержание кислорода в атмосфере гермокамер может достигать 25 % об. и более, а давление — 0,1 МПа и более.

Анализ случаев аварий в процессе освоения гермокамер на ранней стадии показал [1–3], что главными причинами пожаров являлось нерегламентированное

применение изделий электрооборудования, а также горючих веществ и материалов на основе органических соединений, входящих в состав одежды, расходных материалов, конструкций, применяемых в гермокамерах. Большой статистический материал по пожарам на обитаемых космических летательных аппаратах, а также в гермокамерах на испытательных стендах и модулях представлен в [4–6]. В настоящее время количество аварий на объектах защиты, в эксплуатации которых находятся гермокамеры, снизилось. Тем не менее остается актуальным изучение процессов горения и тушения пожаров в условиях повышенного содержания кислорода и давления

в таких важных отраслях народного хозяйства, как медицина, космонавтика и др. В то же время является очевидным тот факт, что процессы горения веществ и материалов в атмосфере с повышенным содержанием кислорода протекают более активно, чем в воздушной среде. Например, для сравнения, температура пламени при горении метана на воздухе достигает 1900 °С, а в кислороде — 2700 °С. Еще более высокие температуры отмечаются в результате сгорания в чистом кислороде водорода (более 2800 °С) и ацетилена (более 3000 °С). Отсюда следует, что повышение пожарной опасности веществ и материалов в среде с содержанием кислорода выше 21 % об. нельзя не учитывать при разработке мер по обеспечению пожарной безопасности и противопожарной защиты объектов, на которых эксплуатируются гермокамеры.

К опасным факторам возникновения и развития пожара в гермокамере можно отнести:

- электрические разряды и проводники, нагретые при токовых нагрузках, в результате чего происходит воспламенение горючих материалов;
- атмосфера, отличная от воздушной, в которой содержание кислорода превышает 21 % об.;
- токсичные продукты горения, образующиеся при окислительной реакции горения полимерных (искусственных и природных) веществ, материалов и конструкционных изделий, например одежды, расходных медицинских материалов, термореактивных и термопластичных пластмасс;
- повышенные температура и давление в штатном режиме эксплуатации и при аварии;
- разрушение узлов, изделий и в целом оборудования.

Исходя из пожарной опасности гермокамер, необходимости предотвращения пожара и недопустимости сверхнормативных пожарных рисков, исследования по обеспечению пожарной безопасности этого оборудования проводятся в следующих направлениях:

- исследование в обогащенных кислородом средах параметров горения различных материалов в целях создания полимеров с высокими предельными характеристиками по горючести и выбора наименее горючих из них;
- изучение закономерностей воспламенения материалов гермокамер от электрических разрядов, от нагревания при токовых перегрузках и от других воздействий;
- исследование закономерностей развития (скорость распространения пламени, тепловыделение при горении, время достижения предельно допустимых значений температуры и давления) и закономерностей процессов тушения пожаров в рабочем диапазоне параметров атмосферы

(выбор наиболее эффективных огнетушащих веществ (ОТВ), средств обнаружения и тушения, способов подачи ОТВ).

Цель работы заключается в поиске способов снижения горючести материалов и исследовании параметров пожарной опасности в условиях гермокамер с повышенным содержанием кислорода и повышенным давлением.

Задачами исследований являлись определение граничных условий применения материалов при повышенных значениях температуры, содержания кислорода и давления, анализ результатов экспериментальных исследований горючести материалов, применяемых в гермокамерах.

Методы исследований

Исследования пожарной опасности фрагментов кабелей, формируемых из проводников с полиэтиленовой изоляцией с использованием покрытий из термостойких материалов, проводились по следующей методике. В качестве образцов применялись отрезки жгутов проводников длиной 250 мм сечением 0,35–1,50 мм² с количеством жил от 4 до 20 при диаметре фрагмента 4–12 мм. Жгут формировали либо путем обмотки лентой с перекрытием или без перекрытия, либо с помощью чехла из полиимидной пленки в два слоя с фиксацией его тканью из волокна арамид-Т или стекловолокна с последующей обмоткой лентой или тканью.

Исследование временных характеристик процесса горения неметаллических материалов при повышенном давлении проводят обычно в сосуде, объем которого рассчитывают на условиях отсутствия влияния на процесс коэффициента избытка окислителя и накопления продуктов горения. Расчеты показывают, что для исследования горения образцов материалов, наиболее широко используемых в барокамерах (хлопчатобумажные ткани) площадью около 0,05 м², необходим сосуд вместимостью более 0,3 м³. Проведение экспериментов на таких установках при повышенных давлениях весьма трудоемко, а их устройство сложно. Создание внутри таких сосудов хорошо перемешанных смесей с точно заданным содержанием окислителя требует больших затрат времени. Влияние расходования кислорода на процесс горения материалов может быть исключено путем проведения опытов в потоке, имеющем скорость не менее 0,15 м/с, поскольку при скорости 0,15–1,50 м/с поток слабо влияет на среднеквадратичную (по направлению горения) скорость распространения пламени. Как показывают специальные измерения, скорость вентиляционных потоков в гермокамерах составляет 0,10–0,25 м/с, поэтому можно проводить эксперименты при скорости среды около образца 0,20–0,25 м/с.

С учетом этого была разработана экспериментальная установка для исследования скорости и площади сгорания материала в среде с различным содержанием кислорода при давлении до 0,7 МПа.

В качестве рабочей емкости использовали цилиндрический сосуд из нержавеющей стали высотой 750 мм и внутренним диаметром 155 мм. Сосуд снабжен окном размером 350×120 мм для наблюдения за горением образца материала и киносъемки процесса горения. Окно состоит из двух частей: внешней, силовой, из органического стекла толщиной 35 мм и внутренней, защитной, из тонкого неорганического стекла.

Образец размером 350×140 мм натягивали на рамку из нержавеющей стали. На поверхность образца наносили две взаимно перпендикулярные линии, проведенные через точку зажигания с метками через 1 см. Рамку закрепляли на верхнем фланце сосуда, через который выведено шесть электроизолированных электродов. Рамку и образец устанавливали вертикально параллельно плоскости окна. Образец освещался четырьмя электрическими лампами, установленными внутри сосуда.

Для зажигания образца использовали спираль из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм, прикрепляемую перед опытом к образцу на расстоянии 60 мм от его нижнего края. Напряжение, необходимое для нагрева спирали, подавалось от лабораторного трансформатора.

Для создания в сосуде газового потока использовали смесительное устройство, обеспечивающее подачу смеси с заданной концентрацией кислорода с точностью 0,5 % при давлении до 0,7 МПа и расходах до $5 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Диапазон изменения давления среды в экспериментах составлял 0,1–0,8 МПа. Концентрация кислорода в рабочей смеси N₂–O₂ изменялась в пределах 21–28 % об. Газовая смесь подавалась в нижнюю часть сосуда, где для создания по его сечению равномерного потока были установлены три латунные сетки.

Давление в сосуде измерялось образцовым манометром с пределом измерения до 1 МПа. Газовая смесь при выходе из сосуда очищалась от твердых продуктов горения в фильтре, охлаждалась и через вентиль, используемый для регулирования давления в сосуде, выбрасывалась в вентиляционную систему.

Обсуждение результатов исследований

Процессы горения материалов в обогащенных кислородом средах при повышенных давлениях. Разработка материалов пониженной горючести

Задачами исследования являлись определение граничных условий применения материалов при

повышенных значениях температуры, содержания кислорода и давления, а также создание материалов пониженной горючести.

Для определения способности материалов к горению в средах с различным содержанием кислорода обычно используется предельная концентрация кислорода (ПКК) $C_{пр}$ (% об.), при превышении которой возможно горение материала [4].

Испытания проводят при зажигании образца как сверху, так и снизу в азотно-кислородной атмосфере с точностью содержания кислорода до 0,1 % об. Чем выше содержание кислорода в азотно-кислородной смеси, при котором образец не горит, тем менее горючим является образец.

Изучение зависимости ПКК от факторов, характеризующих условия применения материалов, позволяет оценить пожарную опасность при их использовании и выявить конструктивные приемы по ее снижению. С этой целью проводились экспериментальные исследования ПКК в зависимости от давления среды, наличия теплоотводящих поверхностей, негорючей защитной оболочки материала и введения в состав полимерной композиции ингибиторов, содержащих азот, хлор и фосфор.

Предварительные исследования показали, что величина $C_{пр}$ слабо зависит от геометрических размеров образца (существенное снижение данного показателя наблюдалось при толщине материала менее 2–3 мм), а также от скорости газового потока.

Исследования влияния давления среды на ПКК показали, что в диапазоне давлений от 0,05 до 0,15 МПа эта характеристика изменяется незначительно. При значениях ниже 0,05 МПа наблюдается резкое повышение ПКК, что обусловлено наличием предельного давления [7–10].

Наличие теплоотводящей поверхности ведет к повышению ПКК. При этом определялась зависимость ПКК от толщины металлической подложки и толщины материала на ней. Установлено, что она возрастает с увеличением толщины подложки и уменьшением толщины материала на ней. Это объясняется тем, что при горении в материале и подложке устанавливается градиент температур, который и определяет величину ПКК. Следовательно, добиваясь плотного контакта подложки с материалом и уменьшения толщины материала (например, лакокрасочных покрытий), можно повысить предельную концентрацию кислорода.

Увеличение ПКК можно обеспечить также применением негорючей оболочки материала, например из стеклоткани. Оболочка из стеклоткани играет роль диффузионного и теплового экрана, уменьшая тепловой поток из зоны горения к поверхности материала и препятствуя диффузии продуктов окисления от поверхности в зону горения.

Одним из способов снижения горючести проводников в составе кабельных сетей с полиэтиленовой изоляцией, отличающейся экономичностью, малой токсичностью, отсутствием хладотекучести, является экранирование проводников чехлом из термостойкого негорючего материала. Пожарная безопасность таких кабелей не обеспечивается применением однослойного покрытия из негорючего материала, формируемого путем обмотки лентой или тканью, и требует разработки специальной конструктивной защиты при использовании их в составе кабельных жгутов в обогащенных кислородом средах. Воздействие источника нагревания в виде пламени или раскаленной от токовой перегрузки жилы приводит к образованию расплава из материала изоляции проводников, просачиванию его через покрытие и интенсивному горению кабеля. Результаты исследования пожарной опасности фрагментов кабелей из проводников с полиэтиленовой изоляцией из термостойких материалов приведены в работе [11].

Большинство материалов, составляющих фрагменты кабеля, являются горючими. Наименьшей горючестью из исследованных фрагментов обладает кабель с покрытием в виде сплошного чехла из полиимидной пленки в два слоя и наружного чехла из волокон арамида-Т или стеклоткани. Для этого состава покрытия значение $C_{пр}$ составило 46 %. Эти данные были получены в ходе исследований на способность к воспламенению различных фрагментов кабелей под действием нагретых токовой перегрузкой жил кабеля путем варьирования числа одновременно нагруженных жил (при уменьшении их количества способность кабеля к воспламенению снижалась). По результатам выполненной работы можно заключить, что в качестве пожаробезопасного покрытия кабельных жгутов из проводников с изоляцией на основе полиэтилена для применения в атмосфере, обогащенной кислородом до 40 %, может быть использована комбинация сплошного чехла из полиимидной пленки в два слоя и наружного чехла из волокон арамида-Т или стеклоткани.

В целях создания материалов с высокой предельной концентрацией кислорода проводились исследования влияния на ПКК химического состава и структуры материалов. Установлено, что для материалов, не содержащих веществ, ингибирующих реакцию горения, наблюдается снижение ПКК с увеличением в макромолекуле полимера количества атомов водорода. Иное влияние на предельную концентрацию кислорода оказывает углерод в составе полимерного материала. Результаты опытов показали, что более карбонизированные композиции материала имеют и более высокие значения ПКК, что обусловлено

теплопотерями излучением из зоны горения, которые составляют около 75 % от общего тепловыделения.

Влияние на величину ПКК содержания в составе материала инертных наполнителей определяли на модельных композициях, включающих эпоксидную смолу и кварцевый песок в различных соотношениях. Опыты показали, что существенное повышение ПКК наблюдается лишь для материалов, содержащих значительное количество (80–90 % масс.) инертного наполнителя. Для искусственных кож, имеющих в составе несколько компонентов, горючесть определяется наиболее горючим из них.

Большой интерес представляют экспериментальные исследования обработки материалов различными огнезащитными пропитками [12–14], которые проводились при атмосферном давлении. Результаты исследований представлены в таблице и на рис. 1.

Из данных таблицы видно, что образцы хлопчатобумажной (ХБ), хлопколавсановой и вискозно-лавсановой тканей имеют $C_{пр} = 14–15$ %. Обработка ХБ ткани антипиреном «Пироватекс» повышает значение $C_{пр}$ до 23 %. Такая же величина получена и для хлопколавсановой ткани, в состав которой введена фосфоразотсодержащая добавка. Еще более высокое значение $C_{пр}$ имеет вискозно-лавсановая ткань, обработанная этим же препаратом, а также ХБ ткань, пропитанная антипиреновой добавкой «МС». Заметно больший огнезащитный эффект наблюдается для ХБ ткани с добавкой фосфор-

Предельная концентрация кислорода $C_{пр}$ при обработке материалов огнезащитными покрытиями

The maximum oxygen concentration C_{lim} during the processing of materials with fire-resistant coatings

Состав ткани Fabric composition	Огнезащитное покрытие Fireproof coating	$C_{пр}, \%$ $C_{lim}, \%$
Хлопчатобумажная Cotton	—	14
	Пироватекс / Pirovatex	23
	МС / MS	25
	ОП / OP	32
	Фосфоразотсодержащая пропитка Phosphorus-containing impregnation	31
Хлопок (67 % масс.) + лавсан (33 % масс.) Cotton (67 % wt.) + lavsan (33 % wt.)	—	15
	Фосфоразотсодержащая пропитка Phosphate impregnation	23
Вискоза (67 % масс.) + лавсан (33 % масс.) Viscose (67 % wt.) + lavsan (33 % wt.)	—	15
	Фосфоразотсодержащая пропитка Phosphorus impregnation	25

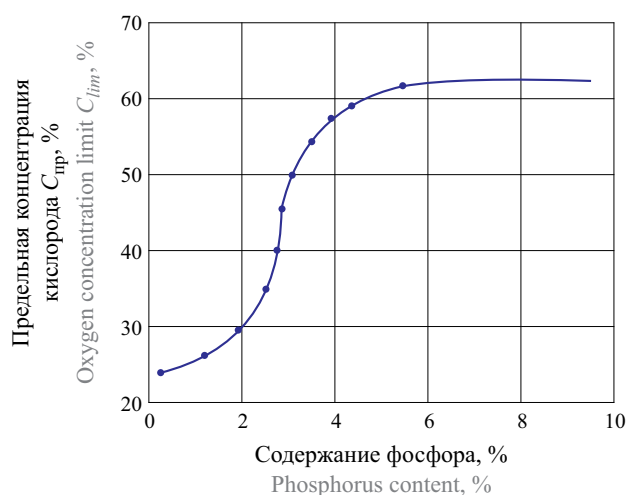


Рис. 1. Зависимость предельной концентрации кислорода от содержания фосфора в ткани, обработанной фосфорной кислотой

Fig. 1. Dependence of the oxygen concentration limit on the phosphorus content in the tissue treated with phosphoric acid

азотсодержащей композиции и антипирена «ОП». В этом случае предельная концентрация кислорода достигает 31–32 %.

На рис. 1 представлены результаты исследований влияния антипиренов на ткани из волокон на основе ароматического полиамида, обработанные фосфорной кислотой. Эксперименты показали, что величина $C_{пр}$ для этих тканей существенно повышается и при содержании фосфора в ткани 5–6 % масс. достигает 60 %.

Исследования текстильных материалов с заданными эксплуатационными свойствами показали, что способность к горению комбинированных тканей различного состава и структуры зависит от характера распределения волокон в материале, а также от физико-химических свойств входящих в комбинированную ткань компонентов. Наиболее высокие значения ПКК получены, например, для модельных комбинированных тканей, состоящих из карбида, покрытого одним или несколькими слоями аримида-Т. Покрытие тканью из аримида-Т таких тканей, как лавсан и капрон, образующих при горении расплав, а также ХБ ткани, способной к тлению в этих условиях, не оказывает защитного действия при горении.

Исследования по понижению горючести блочных строительных композиций (на примере пенополиуретана — ППУ), применяемых в качестве теплоизоляционных материалов, проводились с применением галоген- и фосфорсодержащих ингибиторов [8]. С помощью фосфора и брома, химически связанных с макромолекулой ППУ, удалось существенно снизить горючесть материала и повысить ПКК, которая зависит от соотношения в материале количества фосфора и брома.

Так, в образцах, содержащих около 4,3 % брома, с увеличением количества фосфора с 0,5 до 2,5 % наблюдалось повышение уровня $C_{пр}$ с 21 до 26 %. Предложен состав ППУ, содержащий 1,5 % фосфора и 4 % брома. Следует заметить, что с повышением в структуре ППУ содержания брома происходит дальнейшее снижение горючести композиции.

Результаты испытаний показали, что галоген- и фосфорсодержащие соединения эффективно снижают горючесть ППУ. Одним из преимуществ таких ингибиторов по сравнению с добавками, такими как пластификаторы, является то, что они не влияют на физико-механические свойства пенопласта. Кроме того, они повышают стабильность огнезащитных свойств во времени и не диффундируют из материала в процессе его эксплуатации. Их влияние на снижение горючести пенопласта основано на образовании при пиролизе полимера оксидов и кислот фосфора, которые действуют как гидрофобное средство, увеличивая выход карбонизированного остатка [15–18]. Это подтверждают опыты: фосфор- и бромсодержащие ППУ после испытаний в калориметре имеют остаток 30–40 % масс., в то время как исходная композиция дает остаток ~10 % масс. Карбонизированный слой приводит к снижению выхода при пиролизе летучих легковоспламеняющихся веществ. Образующийся углеродный каркас физически защищает нижележащие слои пенопласта, снижая горючесть материала. Галогены в составе полимера усиливают этот процесс, так как участвуют в ингибировании горения в газовой фазе [19].

При повышенных давлениях, как показали экспериментальные исследования, ПКК для всех материалов снижается в различной степени. Например, для ХБ ткани с фосфоразотсодержащей пропиткой в диапазоне давлений 0,1–0,8 МПа $C_{пр}$ снижается с 31 до 17 %, для той же ткани с пропиткой «ОП» — с 32 до 18 %. Высокие значения ПКК при атмосферном давлении можно объяснить преобладанием в этих условиях потерь тепла излучением, поскольку с повышением давления роль излучения существенно снижается.

Понижение горючести композиционных материалов (на примере стеклопластиков) может быть обеспечено использованием соединений ряда фосфазенов [20, 21]. Основными компонентами этих материалов являются наполнитель и связующее. В зависимости от природы наполнителя, обладающего низкой горючестью, который используется при создании композита, получают органо-, угле- и стеклопластики. Поэтому горючесть композиционных материалов определяется в основном горючестью связующего, и ее снижения добиваются введением в состав различных антипиренов. Использование

галогенфосфазеновых соединений в качестве антипиренов обусловлено наличием в молекуле таких элементов, как фосфор, азот, галоген. Наиболее эффективными замедлителями горения являются такие фосфоразотсодержащие вещества, в молекуле которых массовое соотношение атомов азота и фосфора меньше 1. Из фосфазенов, в которых на один атом азота приходится один атом фосфора, получают наиболее эффективные антипирены в составе композиционных материалов и, соответственно, наиболее высокие значения ПКК.

Показатели пожарной опасности материалов. Зависимость площади выгорания материалов от скорости распространения пламени

Из характеристик неметаллических органических материалов (например, текстильных, искусственных материалов, наиболее часто используемых в гермокамерах), которые определяют их пожарную опасность, наиболее важной является скорость распространения пламени u_n , см/с, характеризующая динамику развития процесса горения.

Были проведены исследования тканей («Лола», вниивлон, тулен, огнезащищенная и неогнезащищенная ХБ ткань, хлопок, карбимид, фенилон, ариимид-Т, терлон, сульфон-Т) с различным химическим составом, разной способностью и характером горения [22]. Образцы толщиной 50–200 мм испытывали при атмосферном давлении в среде с различным содержанием кислорода, осуществляя их горение сверху вниз. ПКК для этих тканей изменялся от 18 до 66 %. Различие в характере горения тканей заключалось в том, что для одних из них (например, «Лола», вниивлон, тулен, огнезащищенная ХБ ткань) реализовывался гетерогенный режим, при котором горение в виде тления протекает практически без пламени. Для этих тканей характерно низкое значение u_n и достаточно высокая ПКК, составляющая 43–66 %. Для других тканей (хлопок неогнезащищенный, карбимид, сульфон-Т и др.), горение которых происходит в газовой фазе пламенем значительных размеров, ПКК существенно ниже и изменяется от 18 до 30 %.

При росте давления и содержания кислорода в замкнутом пространстве увеличивается скорость распространения пламени u_n , одновременно возрастают скорости выделения тепла и продуктов горения. Экспериментально определялись зависимости пройденного пламенем пути в различных направлениях относительно точки зажигания от ориентации плоскости материала, направления и скорости вынужденного (обогащенного кислородом) газового потока, площади выгорания материала во времени [23].

Исследования показали, что в диапазоне скоростей вынужденного газового потока от 0 до 1,5 м/с вели-

чина u_n зависит в основном от свойств материала (его вида, структуры, горючести, направления движения фронта пламени) и газодинамических условий, регламентируемых взаимодействием вынужденной и естественной конвекции: с ростом скорости вынужденного потока увеличивается и скорость распространения пламени u_n .

Определение зависимости u_n от давления газовой среды P и содержания в ней кислорода $C_{ок}$ показало, что скорость горения возрастает с ростом давления и содержания кислорода для всех направлений горения (рис. 2 и 3). При этом одновременно сокращается время выгорания определенной площади материала. Практически для всех исследованных материалов определена зависимость площади выгорания S от времени τ на участке установившегося развитого процесса горения ткани, которая аппроксимируется выражением:

$$S = k\tau^n, \quad (1)$$

где k — коэффициент, значение которого зависит от плотности материала, а также параметров состояния среды (давление, содержание кислорода) и может быть принято из [23]; $n = 2,27\text{--}3,84$.

Особенно сильная зависимость $u_n = f(P)$ наблюдается для случая горения образца вверх. Это можно объяснить тем, что в условиях плотной среды влияние подъемных сил и естественной конвекции на процесс распространения пламени возрастает. Как уже отмечалось, скорость распространения

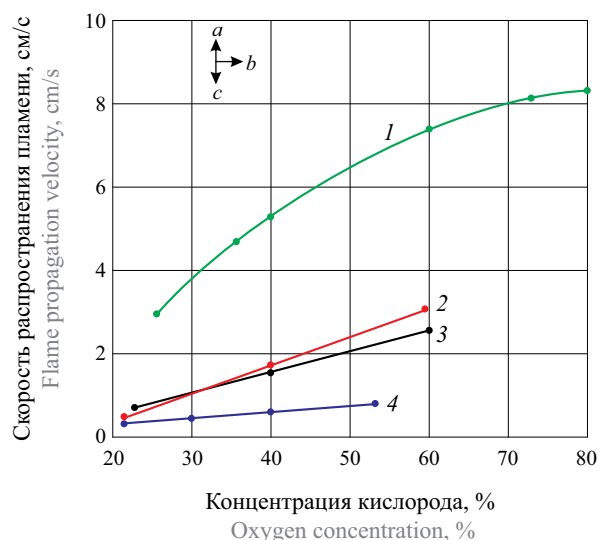


Рис. 2. Зависимость скорости распространения пламени от концентрации кислорода в смеси и направления горения: 1–3 — полотно капроновое (артикул 56003) в направлении, соответственно, a , b и c ; 4 — провод полиэтиленовый МПКМУ в направлении a (диаметр 1 мм)

Fig. 2. Dependence of the flame propagation velocity on the oxygen concentration in the mixture and the direction of combustion: 1–3 — nylon cloth (article 56003) in the direction accordingly a , b and c ; 4 — wire fire polyethylene MPCMU (diameter 1 mm)

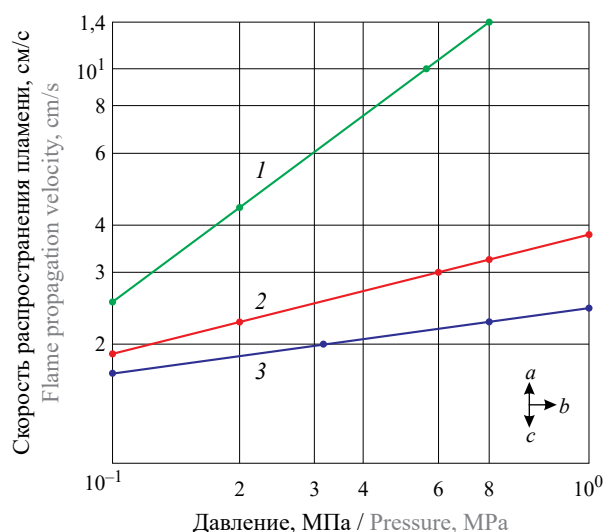


Рис. 3. Зависимость скорости распространения пламени для хлопчатобумажной ткани (артикул 234) от давления среды и направления горения: 1 — а; 2 — b; 3 — c

Fig. 3. The dependence of the flame propagation velocity for cotton (cotton) fabric (article 234) on the pressure of the medium and the direction of combustion: 1 — a; 2 — b; 3 — c

пламени u_n вверх намного превышает скорость его движения в других направлениях. Например, для ХБ тканей плотностью $\rho = 0,148 \text{ кг/м}^2$ при давлении 0,8 МПа скорость распространения пламени вверх составляет 0,14 см/с, а вниз при том же давлении — 0,24 см/с.

В работах [24, 25] аналитически показано, что для тканей на основе одного и того же вещества (натуральные или химические волокна) произведение параметра u_n на плотность ткани ρ — величина постоянная. Выявленная закономерность является важной с практической точки зрения, так как позволяет по результатам для одного материала определять величину u_n и для других материалов по значению их плотности. В работе [24] проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости скорости распространения пламени в воздушной среде снизу вверх от плотности ХБ тканей. Оказалось, что в исследованном диапазоне плотностей материала ρ (от 400 до 2800 кг/м³) скорость распространения пламени по ХБ тканям может быть представлена эмпирической формулой:

$$u_n = 0,24\rho^{-1,26}. \quad (2)$$

В представительных экспериментальных исследованиях (в гермокамерах объемом 0,1 и 2,5 м³) проведены исследования [25] процессов горения полимерных материалов (пенополистирола, полиметилметакрилата, двойной капроновой ленты и капроновых тканей) при изменении температуры и давления газовой среды с повышенным содержанием кислорода. В опытах устанавливали зависимость среднеобъемной температуры газовой среды

от времени горения, геометрических размеров образца (в том числе при изменении скорости потока с повышенным содержанием кислорода). На основании физических моделей исследуемых процессов получены зависимости изменения среднеобъемной температуры газовой среды при горении полимерных материалов в замкнутых объемах, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Установлено, что при горении полимерных материалов в герметичных камерах рост температуры газовой среды происходит до определенного значения, обусловленного площадью горения образца материала, условиями теплообмена и размерами (площадью) тепловоспринимающих поверхностей камер.

Теплота сгорания материалов

Теплота сгорания Q также является важным показателем пожарной опасности горючих веществ и материалов. Величину Q используют при сравнительной оценке горючести материалов, в расчетах при определении уровня пожарной опасности объектов защиты, параметров тушения пожаров. Значения Q определяют калориметрическим методом¹ в атмосфере кислорода при давлении ~3 кПа. Естественно, эти значения могут отличаться от значений, полученных при других условиях (в атмосфере, отличной от кислородной и, соответственно, близкой к реальной). Кроме того, в литературе отсутствовали сведения о значениях теплоты сгорания в атмосфере с изменяющимся соотношением кислорода и азота. В связи с этим были проведены соответствующие исследования, результаты которых представлены в [26].

Экспериментальная установка в основном соответствовала¹. В качестве образцов для испытаний выбирали материалы, сильно отличающиеся по химическим и физическим свойствам. На рис. 4 представлены результаты опытов.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что значения теплоты сгорания разных материалов существенно отличаются друг от друга. Например, в атмосфере с 80%-ным содержанием кислорода теплота сгорания бумаги составляет 13,4 МДж/кг, а углеродной ткани — 32,7 МДж/кг. Можно также отметить различный характер зависимости параметра Q от концентрации кислорода в потоке. Так, для органического стекла и углеродной ткани эта величина остается практически постоянной с изменением концентрации кислорода при выделении тепла в количестве, близком к максимально возможному. Это означает, что для органического стекла и углеродной ткани на воздухе

¹ ГОСТ Р 56025–2014. Материалы строительные. Метод определения теплоты сгорания. ISO 1716:2010.

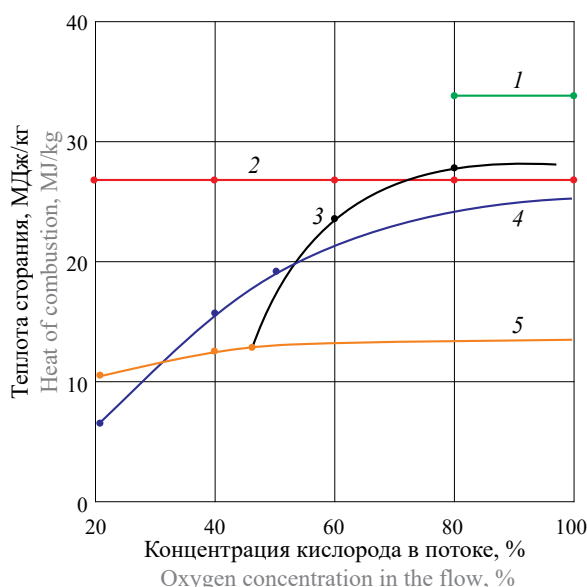


Рис. 4. Зависимость теплоты сгорания материалов от концентрации кислорода в потоке: 1 — углеродная ткань; 2 — органическое стекло; 3 — материал «Лола»; 4 — материал «Оксален-С»; 5 — бумага писчая

Fig. 4. The dependence of the heat of combustion of materials on the oxygen concentration in the flow: 1 — carbon fabric; 2 — organic glass; 3 — “Lola” material; 4 — “Oxalen-S” material; 5 — writing paper

и в кислороде реакция окисления протекает до конца с образованием конечных продуктов реакции. При горении других материалов, таких как бумага, ткани «Лола», «Оксалон-С», с ростом концентрации кислорода тепловыделение увеличивается. Это обусловлено тем, что при горении этих материалов, наряду с горючими летучими соединениями, образуется коксовый остаток, а его горение возможно лишь в атмосфере с высоким содержанием кислорода. В этих условиях с увеличением концентрации кислорода в газовой фазе количество недогоревшего коксового остатка уменьшается, в результате чего теплота сгорания материала возрастает.

Таким образом, из полученных результатов можно сделать вывод, что теплота сгорания в значительной степени зависит от условий, при которых происходит горение. В реальных пожарах теплота сгорания веществ и материалов может быть существенно ниже, поэтому при оценке пожарной опасности полимеров целесообразно пользоваться величиной Q , определенной при рабочих параметрах атмосферы. Вместе с тем значения теплоты сгорания, представленные в справочной литературе и полученные стандартным методом в атмосфере кислорода, имеют определенный запас надежности.

Температура самовоспламенения

Наряду с характеристикой горючести материалов, важными параметрами, определяющими его чув-

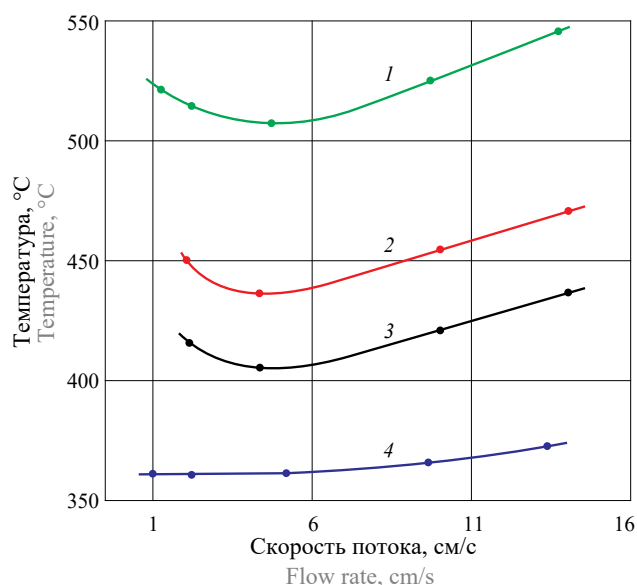


Рис. 5. Зависимость температуры самовоспламенения полиметилметакрилата от скорости потока для различных концентраций кислорода: 1 — 21 % об.; 2 — 40 % об.; 3 — 60 % об.; 4 — 100 % об.

Fig. 5. Dependence of the self-ignition temperature of poly methyl methacrylate on the flow rate for different oxygen concentrations: 1 — 21 % vol.; 2 — 40 % vol.; 3 — 60 % vol.; 4 — 100 % vol.

ствительность к воспламенению, являются энергетические характеристики его источников зажигания (для веществ и материалов — температура, тепловой поток). Для определения энергетических характеристик экспериментально определяли температуру самовоспламенения материала (тепловой источник) от различных источников зажигания [27, 28].

Экспериментальные исследования условий самовоспламенения материалов проводили при давлении от 0,02 до 0,25 МПа и концентрации кислорода до 100 %. На рис. 5 представлена зависимость температуры самовоспламенения полиметилметакрилата от скорости потока при различных концентрациях кислорода.

Поскольку в данном случае воспламенение твердого материала происходит в пограничном слое, наличие экстремума на рис. 5 можно объяснить взаимодействием свободной и вынужденной конвекции в режиме противотока. С повышением концентрации окислителя наблюдается постепенное вырождение экстремума температуры и слабое влияние на время тушения режима обтекания образца газовым потоком. Иначе говоря, эффект взаимодействия свободной и вынужденной конвекции нивелируется окислительными процессами в условиях высокого содержания в атмосфере кислорода.

Результаты исследований зависимости температуры самовоспламенения от давления и концентрации кислорода в потоке показывают, что вблизи

пределов горения по концентрации окислителя и давлению температура самовоспламенения существенно возрастает и наступает режим, в котором может происходить газификация образца без воспламенения.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований пожарной опасности строительных и конструкционных материалов в обогащенных кислородом средах и при повышенном давлении предложены пути повышения предельной концентрации кислорода (ПКК) и снижения горючести материалов, а именно: применение теплоотводящей поверхности, негорючей оболочки; введение ингибиторов в их состав и структуру; поверхностная обработка различными огнезащитными составами и пропитками.

Установлено, что предельная концентрация кислорода зависит от геометрических размеров образца (существенное снижение ПКК наблюдалось лишь при толщине материала менее 2–3 мм), а также от скорости газового потока. При повышенных давлениях ПКК для всех материалов снижается. В диапазоне давлений от 0,05 до 0,15 МПа эта характеристика изменяется незначительно, а при значениях ниже 0,05 МПа наблюдается резкое повышение ПКК, что обусловлено наличием предельного давления.

Наличие теплоотводящей поверхности ведет к повышению ПКК, которая возрастает с увеличением толщины подложки и уменьшением толщины материала на ней. Это объясняется тем, что при горении в материале и подложке устанавливается градиент температур, который и определяет величину предельной концентрации кислорода. Повышение ПКК можно обеспечить также применением негорючей оболочки материала, например из стеклоткани. Оболочка из стеклоткани играет роль диффузионного и теплового экрана, уменьшая тепловой поток из зоны горения к поверхности материала и препятствуя диффузии продуктов пиролиза от его поверхности в зону горения.

Повышения ПКК можно добиться изменением химического состава и структуры полимерного материала. Установлено, что для материалов, не содержащих веществ, ингибирующих реакцию горения, характерно снижение ПКК при увеличении в макромолекуле полимера количества атомов водорода. Иное влияние на ПКК оказывает угле-

род в составе полимерного материала. Результаты опытов показали, что более карбонизированные композиции материала имеют и более высокие значения ПКК. Это обусловлено теплотериями излучением из зоны горения, которые составляют около 75 % от общего тепловыделения.

Исследование влияния содержания в составе материала инертных наполнителей на ПКК на примере композиций, включающих эпоксидную смолу и кварцевый песок в различных соотношениях, показало: существенное повышение ПКК наблюдается лишь для материалов, содержащих большое количество (80–90 % масс.) инертного наполнителя. Для искусственных кож, имеющих в составе несколько компонентов, горючесть обусловлена наиболее горючим из них. Повышения ПКК достигают также путем обработки материалов различными огнезащитными пропитками.

Определены показатели пожарной опасности материалов (температуры самовоспламенения, скорости распространения пламени, площади выгорания, теплоты сгорания, режимов зажигания) в зависимости от давления и содержания кислорода в атмосфере. Предложена аналитическая зависимость скорости распространения пламени от давления газовой среды и содержания в ней кислорода. Показано, что скорость горения возрастает с ростом давления и содержания кислорода в атмосфере для всех направлений горения.

При исследовании зависимости теплоты сгорания материалов в различных азотно-кислородных атмосферах можно отметить ее различный характер. Так, для органического стекла и углеродной ткани эта величина остается практически постоянной с изменением концентрации кислорода. При горении других материалов, таких как бумага, ткани «Лола», «Оксалон-С», с ростом концентрации кислорода возрастает и тепловыделение. Поэтому при оценке пожарной опасности полимеров целесообразно пользоваться величиной теплоты сгорания, определенной при рабочих параметрах атмосферы.

Результаты исследований зависимости температуры самовоспламенения от давления и концентрации кислорода в потоке показывают, что вблизи пределов горения по концентрации окислителя и по давлению температура самовоспламенения существенно возрастает и наступает режим, в котором может происходить газификация материала без воспламенения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ahmed A.F., Hoa S.V. Thermal insulation by heat resistant polymers for solid rocket motor insulation // Journal of Composite Materials. 2012. Vol. 46. Issue 13. Pp. 1544–1559. DOI: 10.1177/0021998311418850
2. Denison D.M., Ernsting J., Cresswell A.W. Hyperbaric oxygen // Lancet. 1966. Vol. 2. Pp. 1404–1406.

3. Denison D.M., Ernsting J., Tonkins W.J., Cresswell A.W. Problem of fire in oxygen-rich surroundings // *Nature*. 1968. Vol. 218. P. 1110.
4. Мелихов А.С. Обеспечение пожарной безопасности гермоотсеков космических летательных аппаратов. М. : ВНИИПО МЧС России, 2021. 728 с.
5. Loganathan T.M., Hameed Sultan M.T., Ahsan Q., Jawaid M., Naveen J., Md Shah A.U. et al. Effect of cyrtostachys renda fiber loading on the mechanical, morphology, and flammability properties of multi-walled carbon nanotubes/phenolic bio-composites // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. Issue 11. P. 3049. DOI: 10.3390/nano11113049
6. Bazaras Ž., Lukoševičius V., Bazaraitė E. Structural materials durability statistical assessment taking into account threshold sensitivity // *Metals*. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 175. DOI: 10.3390/met12020175
7. Болодьян И.А., Волохина А.В., Жевлаков А.Ф., Мелихов А.С., Потякин В.И. О способности тканей к горению при повышенных давлениях // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 14–18.
8. Гриневич С.Н., Ермакова И.С., Жевлаков А.Ф., Мышак Ю.А., Селиванов А.П. Горючесть фосфор-бром-содержащих пенополиуретанов // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 56–61.
9. Shebeko A.Y., Shebeko Y.N., Zuban A.V., Golov T.V. Experimental investigation of the ignition of combustible gas mixtures by friction sparks // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018. Vol. 54. Issue 3. Pp. 264–274. DOI: 10.1134/S0010508218030024
10. Korobeinichev O., Shmakov A., Paletsky A., Trubachev S., Shaklein A., Karpov A. et al. Mechanisms of the action of fire-retardants on reducing the flammability of certain classes of polymers and glass-reinforced plastics based on the study of their combustion // *Polymers*. 2022. Vol. 14. Issue 21. P. 4523. DOI: 10.3390/polym14214523
11. Фланкин Е.В., Востриков И.М., Синельщикова В.В. Исследование пожарной опасности кабелей на основе проводников с полиэтиленовой изоляцией // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 21–29.
12. Романенко И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1991. 321 с.
13. Jeon J., Shin D., Choi W., Kim S.J. Identification of the extinction mechanism of Lean limit hydrogen flames based on Lewis number effect // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 174. P. 121288. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121288
14. Konstantinova N.I., Smirnov N.V., Shebeko A.Y., Tanklevsky L.T. Flammability of polymeric materials used in construction // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 102. Issue 2. P. 10203. DOI: 10.34910/MCE.102.3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/flammability-of-polymeric-materials-used-in-construction>
15. Braun U., Bahr H., Sturm H., Schartel B. Flame retardancy mechanisms of metal phosphinates and metal phosphinates in combination with melamine cyanurate in glass-fiber reinforced poly(1,4-butylene terephthalate): the influence of metal cation // *Polym. Advan. Technol*. 2008. Vol. 19. Issue 6. Pp. 680–692. DOI: 10.1002/pat.1147
16. Ушаков В.А., Асеева Р.М., Андриянов Р.А., Бикбулатова Е.Н. Пути снижения горючести полимерных материалов // *Пластические массы*. 1975. № 12. С. 36.
17. Daal M., Zobrist N., Sadoulet B., Robertson M., Kellaris N. Properties of selected structural and flat flexible cabling materials for low temperature applications // *Cryogenics*. 2019. Vol. 98. Pp. 47–59. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2018.10.019
18. Mascarenhas V.J., Weber C.N., Westmoreland P.R. Estimating flammability limits through predicting non-adiabatic laminar flame properties // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021. Vol. 38. Issue 3. Pp. 4673–4681. DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.026
19. Меркулов В.А., Кузьменко К.П., Болодьян И.А. О предельных условиях горения материалов при повышенных давлениях в O₂-N₂ и O₂-He средах // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 60–63.
20. Ермакова И.С., Жевлаков А.Ф., Жаркова М.А., Соломон З.Г. Способность к горению тканей на основе комбинированных волокон // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 5–10.
21. Ермакова И.С., Демидов М.Л., Кербер М.Л., Селиванов А.П. О снижении способности к горению стеклопластиков при использовании соединений ряда фосфазена // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 10–14.
22. Жевлаков А.Ф., Грошев Ю.М., Волохина А.В., Щетинин А.М. Экспериментальное исследование скорости распространения пламени по тканям различного состава // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1981. С. 15–20.

23. Мелихов А.С., Фланкин Е.В., Третьяков В.А., Синельщикова В.В. Исследование скорости распространения пламени и площади выгорания тканей в средах с различным содержанием кислорода при повышенных давлениях // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 19–29.
24. De Ris J. Spread of a laminar diffusion flame // Symposium (International) on Combustion. 1969. Vol. 12. Issue 1. Pp. 241–252. DOI: 10.1016/s0082-0784(69)80407-8
25. Rodríguez-Prieto A., Camacho A.M., Sebastián M.A. Multicriteria materials selection for extreme operating conditions based on a multiobjective analysis of irradiation embrittlement and hot cracking prediction models // International Journal of Mechanics and Materials in Design. 2018. Vol. 14. Issue 4. Pp. 617–634. DOI: 10.1007/s10999-017-9393-2
26. Попов А.М., Николаев В.М., Мелихов А.С., Болодьян И.А. Расчетно-экспериментальные исследования горения полимерных материалов в замкнутых объемах при повышенном содержании кислорода в атмосфере // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 31–38.
27. Ермакова И.С., Жевлаков А.Ф., Монахов Н.А., Мышак Ю.А. О теплоте сгорания полимерных материалов // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. С. 62–67.
28. Болодьян И.А., Жевлаков А.Ф., Мелихов А.С. О способности полимеров к горению в кислородноазотной атмосфере, содержащей водород // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах : сб. науч. тр. Вып. 2. М. : ВНИИПО, 1977. 6 с.

REFERENCES

1. Ahmed A.F., Hoa S.V. Thermal insulation by heat resistant polymers for solid rocket motor insulation. *Journal of Composite Materials*. 2012; 46(13):1544-1559. DOI: 10.1177/0021998311418850
2. Denison D.M., Ernsting J., Cresswell A.W. Hyperbaric oxygen. *Lancet*. 1966; 2:1404-1406.
3. Denison D.M., Ernsting J., Tonkins W.J., Cresswell A.W. Problem of fire in oxygen-rich surroundings. *Nature*. 1968; 218:1110.
4. Melikhov A.S. *Ensuring fire safety of hermetic compartments of spacecraft*. Moscow, VNIPO EMERCOM of Russia, 2021; 728. (rus).
5. Loganathan T.M., Hameed Sultan M.T., Ahsan Q., Jawaid M., Naveen J., Md Shah A.U. et al. Effect of cyrtostachys renda fiber loading on the mechanical, morphology, and flammability properties of multi-walled carbon nanotubes/phenolic bio-composites. *Nanomaterials*. 2021; 11(11):3049. DOI: 10.3390/nano11113049
6. Bazaras Ž., Lukoševičius V., Bazaraitė E. Structural materials durability statistical assessment taking into account threshold sensitivity. *Metals*. 2022; 12(2):175. DOI: 10.3390/met12020175
7. Bolodyan I.A., Volokhina A.V., Zhevlakov A.F., Melikhov A.S., Potyakin V.I. On the ability of tissues to flame at elevated pressures. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIPO, 1977; 14-18. (rus).
8. Grinevich S.N., Ermakova I.S., Zhevlakov A.F., Myshak Yu.A., Selivanov A.P. Flammability of phosphorus-bromine-containing polyurethane foams. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIPO, 1977; 56-61. (rus).
9. Shebeko A.Y., Shebeko Y.N., Zuban A.V., Golov T.V. Experimental investigation of the ignition of combustible gas mixtures by friction sparks. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018; 54(3):264-274. DOI: 10.1134/S0010508218030024
10. Korobeinichev O., Shmakov A., Paletsky A., Trubachev S., Shaklein A., Karpov A. et al. Mechanisms of the action of fire-retardants on reducing the flammability of certain classes of polymers and glass-reinforced plastics based on the study of their combustion. *Polymers*. 2022; 14(21):4523. DOI: 10.3390/polym14214523
11. Flankin E.V., Vostrikov I.M., Sinelshchikova V.V. Investigation of fire hazard of cables based on conductors with polyethylene insulation. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIPO, 1981; 21-29. (rus).
12. Romanenko I.G., Levites F.A. *Fire protection of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1991; 321. (rus).
13. Jeon J., Shin D., Choi W., Kim S.J. Identification of the extinction mechanism of Lean limit hydrogen flames based on Lewis number effect. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 174:121288. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121288
14. Konstantinova N.I., Smirnov N.V., Shebeko A.Y., Tanklevsky L.T. Flammability of polymeric materials used in construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 102(2):10203. DOI: 10.34910/MCE.102.3 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/flammability-of-polymeric-materials-used-in-construction>

15. Braun U., Bahr H., Sturm H., Scharfel B. Flame retardancy mechanisms of metal phosphinates and metal phosphinates in combination with melamine cyanurate in glass-fiber reinforced poly(1,4-butylene terephthalate): the influence of metal cation. *Polymers for Advanced Technologies*. 2008; 19(6):680-692. DOI: 10.1002/pat.1147
16. Ushakov V.A., Aseeva P.M., Andrianov R.A., Bikbulatova E.N. Ways to reduce the flammability of polymer materials. *Plastic masses*. 1975; 12:36. (rus).
17. Daal M., Zobrist N., Sadoulet B., Robertson M., Kellaris N. Properties of selected structural and flat flexible cabling materials for low temperature applications. *Cryogenics*. 2019; 98:47-59. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2018.10.019
18. Mascarenhas V.J., Weber C.N., Westmoreland P.R. Estimating flammability limits through predicting non-adiabatic laminar flame properties. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021; 38(3):4673-4681. DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.026
19. Merkulov V.A., Kuzmenko K.P., Bolodyan I.A. On the limiting conditions of gorenje materials at elevated pressures in O₂-N₂ and OHe media. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIPO, 1981; 60-63. (rus).
20. Ermakova I.S., Zhevlakov A.F., Zharkova M.A., Solomon Z.G. The ability to combustion fabrics based on combined fibers. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIPO, 1981; 5-10. (rus).
21. Ermakova I.S., Demidov M.L., Kerber M.L., Selivanov A.P. On the reduction of the ability to combustion fiberglass when using compounds of a number of phosphazene. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIPO, 1981; 10-14. (rus).
22. Zhevlakov A.F., Groshev Yu.M., Volokhina A.V., Shchetinin A.M. Experimental study of the flame propagation velocity through tissues of various composition. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Moscow, VNIPO, 1981; 15-20. (rus).
23. Melikhov A.S., Flankin E.V., Tretyakov V.A., Sinelshchikova V.V. Investigation of flame propagation velocity and tissue burnout area in media with different oxygen content at elevated pressures. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIPO, 1977; 19-29. (rus).
24. De Ris J. Spread of a laminar diffusion flame. *Symposium (International) on Combustion*. 1969; 12(1):241-252. DOI: 10.1016/s0082-0784(69)80407-8
25. Rodríguez-Prieto A., Camacho A.M., Sebastián M.A. Multicriteria materials selection for extreme operating conditions based on a multiobjective analysis of irradiation embrittlement and hot cracking prediction models. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2018; 14(4):617-634. DOI: 10.1007/s10999-017-9393-2
26. Popov A.M., Nikolaev V.M., Melikhov A.S., Bolodyan I.A. Computational and experimental studies of the combustion of polymer materials in closed volumes at elevated sod flame. *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIPO, 1977; 31-38. (rus).
27. Ermakova I.S., Zhevlakov A.F., Monakhov N.A., Myshak Yu.A. On the heat of combustion of polymer materials *Issues of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched environments : collection of works*. Issue 2. Moscow, VNIPO, 1977; 62-67. (rus).
28. Bolodyan I.A., Zhevlakov A.F., Melikhov A.S. On the ability of polymers to burn in an oxygen-nitrogen atmosphere containing hydrogen. *Questions of combustion and extinguishing of polymer materials in oxygen-enriched media : collection of scientific papers*. Issue 2. Moscow, VNIPO, 1977; 6. (rus).

Поступила 24.04.2023, после доработки 03.05.2023;

принята к публикации 22.05.2023

Received April 24, 2023; Received in revised form May 3, 2023;

Accepted May 22, 2023

Информация об авторах

БОЛОДЬЯН Иван Ардашевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; Scopus AuthorID: 6508266383; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

Information about the authors

Ivan A. BOLODYAN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; Scopus AuthorID: 6508266383; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

ВОГМАН Леонид Петрович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; Scopus AuthorID: 57722362000; ORCID: 0000-0003-4222-3379; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Leonid P. VOGMAN, Dr. Sci. (Eng.), Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; Scopus AuthorID: 57722362000; ORCID: 0000-0003-4222-3379; e-mail: vniipo-3.5.3@yandex.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus AuthorID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: ikbs@mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.



Евдокимов В.И., Бобринев Е.В., Кондашов А.А. Риски производственного травматизма и гибели личного состава оперативных подразделений МЧС России (2012–2021 гг.) : монография / науч. ред. В.И. Евдокимов ; Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. СПб. : Измайловский, 2022. 147 с. (Серия «Заболеваемость военнослужащих» ; вып. 19).

В подготовке разделов монографии принимали участие: В.А. Маштаков, Н.А. Панкратов, Е.Ю. Удавцова, В.В. Харин.

ISBN 978-5-00182-043-7. Табл. 80, рис. 35, библиогр. 47 назв. тираж 500 экз.

Проанализированы травмы, в том числе фатальные, связанные с исполнением служебных обязанностей, у личного состава (военнослужащих, сотрудников, имеющих специальные звания, и работников) оперативных подразделений МЧС России за 10 лет (2012–2021 гг.).

Полученные травмы соотнесены с причинами (технические, организационные, психофизиологические и опасные факторы пожаров) и 18 обстоятельствами, деятельностью личного состава МЧС России (ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций, учебно-спортивная и повседневная), категориями (оперативный состав, профилактический, технический и управленческий персонал) и оперативными подразделениями МЧС России. В связи с невысокими показателями риска или уровнем производственного травматизма по некоторым обстоятельствам его уровень рассчитали на 10 тыс. человек ($\times 10^{-4}$), гибели — на 100 тыс. ($\times 10^{-5}$). Среднегодовой уровень риска производственных травм у личного состава оперативных подразделений МЧС России в 2012–2021 гг. был $(11,57 \pm 0,68) \cdot 10^{-4}$, гибели — $(9,49 \pm 1,37) \cdot 10^{-5}$. В динамике отмечается уменьшение рисков производственного травматизма и гибели.

Монография будет полезна для широкого круга специалистов, занимающихся вопросами охраны труда, профилактики травматизма в подразделениях МЧС России и в целом по стране. Полная версия книги содержится на сайте Научной электронной библиотеки (eLIBRARY ID: 49594826). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49594826>