

## Новые данные по токсичности продуктов терморазложения изоляции не распространяющих горение кабелей

Сергей Викторович Пузач , Ольга Сергеевна Лебедченко, Руслан Гянджавиевич Акперов

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Экспериментальные исследования токсичности продуктов терморазложения изоляции электрических кабелей, не распространяющих горение, являются актуальными из-за отсутствия величин удельных коэффициентов образования токсичных газов, необходимых для проведения пожарно-технических расчетов.

**Цели и задачи.** Целью статьи является получение новых экспериментальных данных по удельным коэффициентам образования расширенного перечня токсичных газов, образующихся при терморазложении изоляции кабелей, не распространяющих горение.

Для достижения поставленной цели были проведены эксперименты в маломасштабной опытной установке для определения пожарной опасности конденсированных материалов в случае термического разложения электрического кабеля конструкции КВВГнг(A)-LS 4 × 1,5.

**Методы.** Измерение парциальных плотностей токсичных газов и кислорода, а также удельной массовой скорости выгорания образцов кабеля в маломасштабной опытной установке. Обработка экспериментальных данных и анализ полученных результатов.

**Результаты и их обсуждение.** Обнаружено, что при терморазложении испытываемых образцов кабеля образуется смесь токсичных газов (монооксид и диоксид углерода, хлористый водород, циановодород, фосген, диоксид азота и акролеин), которая не учитывается при проведении пожарно-технических расчетов.

Получены зависимости от времени испытаний парциальных плотностей кислорода и вышеуказанных токсичных газов, удельного коэффициента поглощения кислорода и удельных коэффициентов образования токсикантов, а также удельной массовой скорости выгорания образцов.

Для учета масштабного фактора (отличие размеров маломасштабной экспериментальной установки и реального помещения) получены зависимости парциальных плотностей токсичных газов от изменения парциальной плотности кислорода в табличном виде.

Анализ полученных результатов показал, что парциальные плотности токсичных газов превышают или соизмеримы с их критическими значениями для человека.

**Заключение.** Полученные новые экспериментальные данные по удельным коэффициентам образования вышеуказанных токсичных газов могут быть использованы при расчете пожарных рисков в помещениях, где используются или производятся кабели, не распространяющие горение.

**Ключевые слова:** температурный режим; токсичные газы; парциальная плотность; удельные коэффициенты образования токсичных газов; критическая концентрация

**Для цитирования:** Пузач С.В., Лебедченко О.С., Акперов Р.Г. Новые данные по токсичности продуктов терморазложения изоляции не распространяющих горение кабелей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 6. С. 12–22. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.12-22

 Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

## New data on the toxicity of thermal decomposition products from flame-retardant cable insulation

Sergey V. Puzach , Olga S. Lebedchenko, Ruslan G. Akperov

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Experimental studies of the toxicity of the thermal decomposition products of the insulation of non-combustible electrical cables are relevant due to the lack of specific coefficients for the formation of toxic gases, which are necessary for fire-technical calculations.

**Goals and objectives.** The purpose of the paper is to obtain new experimental data on the specific coefficients of formation of an extended list of toxic gases that are formed during the thermal decomposition of the insulation of non-combustible cables. To achieve this goal, experiments were conducted in a small-scale experimental setup to determine the fire hazard of condensed materials in the case of thermal decomposition of the KVVNg(A)-LS 4 × 1.5 electric cable.

**Methods.** Measurement of the partial densities of toxic gases and oxygen, as well as the specific mass burn-out rate of cable specimens in a small-scale pilot plant. Processing of experimental data and analysis of the obtained results.

**Results and discussion.** It was found that during the thermal decomposition of the cable specimens under test, a mixture of toxic gases (carbon monoxide and dioxide, hydrogen chloride, hydrogen cyanide, phosgene, nitrogen dioxide, and acrolein) is formed, which is not taken into account in fire-technical calculations.

The dependence of the partial densities of oxygen and the above-mentioned toxic gases, the specific absorption coefficient of oxygen, and the specific formation coefficients of toxicants, as well as the specific mass rate of combustion of the specimens, on the test time was obtained.

To account for the scale factor (the difference in size between the small-scale experimental setup and the real room), the partial densities of toxic gases were plotted against the change in partial density of oxygen.

The analysis of the results showed that the partial densities of toxic gases exceeded or were comparable to their critical values for humans.

**Conclusion.** The new experimental data on the specific coefficients of formation of the above-mentioned toxic gases can be used in the calculation of fire risks in rooms where non-combustible cables are used or manufactured.

**Keywords:** temperature conditions; toxic gases; partial density; specific coefficients of formation of toxic gases; critical concentration

**For citation:** Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Akperov R.G. New data on the toxicity of thermal decomposition products from flame-retardant cable insulation. *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(6):12-22. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.06.12-22 (rus).

✉ *Sergey Viktorovich Puzach*, e-mail: puzachsv@mail.ru

## Введение

В соответствии с указом Президента Российской Федерации<sup>1</sup> и приказом МЧС России<sup>2</sup> необходимо проводить пожарно-технические расчеты с учетом новых научно-технических достижений, позволяющих с большей достоверностью определять теплофизические и химические показатели для современных материалов, а также получать теплофизические и химические показатели современных веществ и материалов, необходимые для пожарно-технических расчетов [1–3].

В настоящее время широкое использование получили электрические кабели, не распространяющие горение (кабели НГ) [4, 5]. Нераспространение горения обеспечивается наличием в составе изоляционного материала кабелей веществ класса антипиренов. Изменение химического состава изоляционного материала приводит к тому, что теплофизические свойства горючей нагрузки «кабели НГ» существенно отличаются от теплофизических свойств кабелей, распространяющих горение (кабели РГ) [6–8]. Однако динамика развития пожара [9, 10] и токсикологическая обстановка на пожаре при горении кабелей НГ в помещениях при их производстве или использовании до настоя-

щего времени мало изучены [11, 12]. От состава изоляционных материалов зависит состав компонентов термической деструкции [13]. В настоящее время идет пересмотр острой ингаляционной токсичности монооксида углерода и цианистого водорода: сравнение моделей для решения проблемы летальности и выведения из строя в зависимости от концентрации и времени [14].

В работах [15, 16] представлены результаты экспериментальной оценки токсичности продуктов горения некоторых видов кабелей НГ. Исследуемый состав продуктов горения был ограничен только двумя высокотоксичными газами — монооксидом углерода и циановодородом.

Однако при терморазложении изоляции вышеуказанных кабелей состав токсичных продуктов горения гораздо шире [9–11] из-за ее химического состава.

Поэтому вопросы проведения экспериментальных исследований токсичности продуктов терморазложения изоляции кабелей НГ являются актуальными.

Актуальность и практическая значимость исследований пожароопасных свойств кабелей НГ также подтверждается происходящими крупными пожарами.

Например, 20 сентября 2024 г. в г. Подольске Московской области произошел пожар в здании кабельного завода<sup>3</sup>. На заводе АО «СПКБ Техно» производят огнестойкие кабели для систем охранно-

<sup>1</sup> Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года : Указ Президента РФ от 1 января 2018 г. № 2.

<sup>2</sup> Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533.

<sup>3</sup> URL: <https://aif.ru/incidents/ploshchad-pozhara-na-kabelnom-zavode-v-podolske-dostigla-4-8-tys-kv-metrov> (дата обращения: 27.06.2025).



a



b

**Рис. 1.** Пожар в здании кабельного завода: *a* — процесс тушения производственного корпуса<sup>4</sup>; *b* — вид развитой стадии пожара в производственном корпусе<sup>5</sup>

**Fig. 1.** Fire in a cable factory building: *a* — the process of extinguishing the production<sup>4</sup>; *b* — a view of the advanced stage of a fire in a production building<sup>5</sup>

пожарной сигнализации и безопасности телекоммуникаций. Площадь возгорания составила 4,8 тыс. м<sup>2</sup> (рис. 1). Огнем были охвачены третий и четвертый этажи, произошло обрушение кровли здания завода. Порядка 30 человек самостоятельно эвакуировались. Предварительно причиной пожара названо короткое замыкание в электросети<sup>4,5</sup>.

Целью статьи является получение новых экспериментальных данных по удельным коэффициентам образования расширенного перечня токсичных газов, образующихся при терморазложении изоляции кабелей НГ, что необходимо для проведения пожарно-технических расчетов (например, определение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами).

Для достижения поставленной цели были проведены эксперименты с определением для кабеля конструкции КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 при его терморазложении парциальных плотностей следующих токсичных газов: монооксид и диоксид углерода, хлористый водород, циановодород, фосген, диоксид азота, а также акролеин.

### Методы

Использовался экспериментальный метод измерения парциальных плотностей токсичных газов и кислорода, а также удельной массовой скорости выгорания образцов кабеля в маломасштабной опытной установке.

Была проведена обработка экспериментальных данных и выполнен анализ полученных результатов.

<sup>4</sup> URL: <https://www.pnp.ru/incident/v-podolske-gorit-zavod-na-ploshhadi-48-kvadratnykh-metrov.html> (дата обращения: 27.06.2025).

<sup>5</sup> URL: <https://tvpodolsk.ru/news/incidents/v-podolske-tushat-krupnyy-pozhar/> (дата обращения: 27.06.2025).

### Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проведены на экспериментальной установке [16]<sup>6</sup>.

Система измерения концентраций токсичных газов, помимо использования многоканального автоматического проточного газоанализатора типа Dräger X-am 7000, в отличие от работ [15–17] подверглась модификации путем добавления в измерительный участок следующего газоаналитического оборудования (производитель ООО «НПО «ПРИБОР» ГАНК»): газоанализатор универсальный «ГАНК-4» и газоанализатор универсальный ЭКОЛОАБ Плюс. Это позволило расширить номенклатуру измеряемых газов по сравнению с работами [15–17].

При проведении испытаний измерялась масса образца (погрешность не более ± 1 мг) и парциальные плотности следующих газов: монооксид углерода (CO), диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), циановодород (HCN), кислород (O<sub>2</sub>), хлороводород (HCl), фосген (COCl<sub>2</sub>), акролеин (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O), монооксид азота (NO), диоксид азота (NO<sub>2</sub>).

Допустимые погрешности измерения парциальных плотностей газов не превышали 10 %.

### Исходные данные для проведения экспериментов

Исследуемый кабель КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 предназначен для неподвижного присоединения к электрическим приборам, аппаратам, сборкам зажимов электрических распределительных устройств с номинальным переменным напряжением до 660 В частоты до 100 Гц или постоянным

<sup>6</sup> Патент Российской Федерации на полезную модель № 174688. Заявка № 2017113747, приоритет полезной модели 20.04.2017 г. (дата государственной регистрации: 26.10.2017 г.).

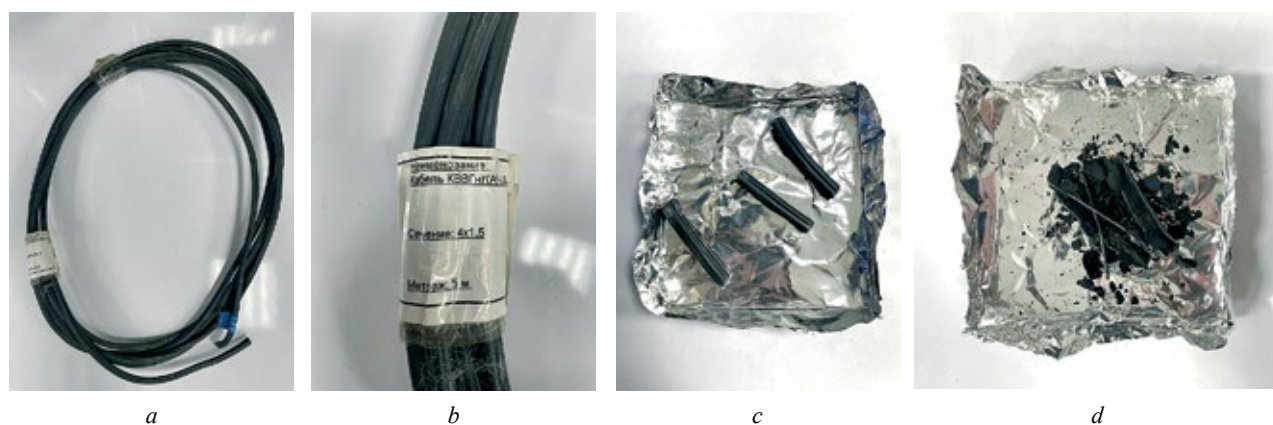


Рис. 2. Фотографии образцов кабеля конструкции КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 до и после испытаний

Fig. 2. Photos of specimens of KVVGng(A)-LS 4 × 1.5 cable before and after testing

напряжением до 1000 В. Кабель применяется для прокладки на открытом воздухе, в кабельных сооружениях и помещениях, в условиях агрессивной среды, при отсутствии механических воздействий, в том числе для использования в системах атомных электростанций. Имеет однопроволочную токопроводящую жилу круглой формы, изоляцию из поливинилхлоридной композиции пониженной пожарной опасности и оболочку из поливинилхлоридной композиции пониженной пожарной опасности<sup>7</sup>.

Фотографии образцов кабеля конструкции КВВГнг(А)-LS 4 × 1,5 представлены на рис. 2.

<sup>7</sup> URL: [https://cable.ru/cable/marka-kvvngng\\_a\\_ls\\_4x1\\_5.php#description](https://cable.ru/cable/marka-kvvngng_a_ls_4x1_5.php#description) (дата обращения: 23.06.2025).

Масса образцов кабелей составляла от 14 до 16 г и была подобрана таким образом, чтобы полученные значения концентрации газов в экспозиционной камере не выходили за максимальный предел измерения используемых газоанализаторов.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3 и 4 представлены зависимости от времени испытаний парциальных плотностей кислорода и токсичных газов, образующихся при горении кабелей НГ. Количество кривых соответствует количеству проведенных экспериментов (каждому эксперименту соответствует свой цвет кривых).

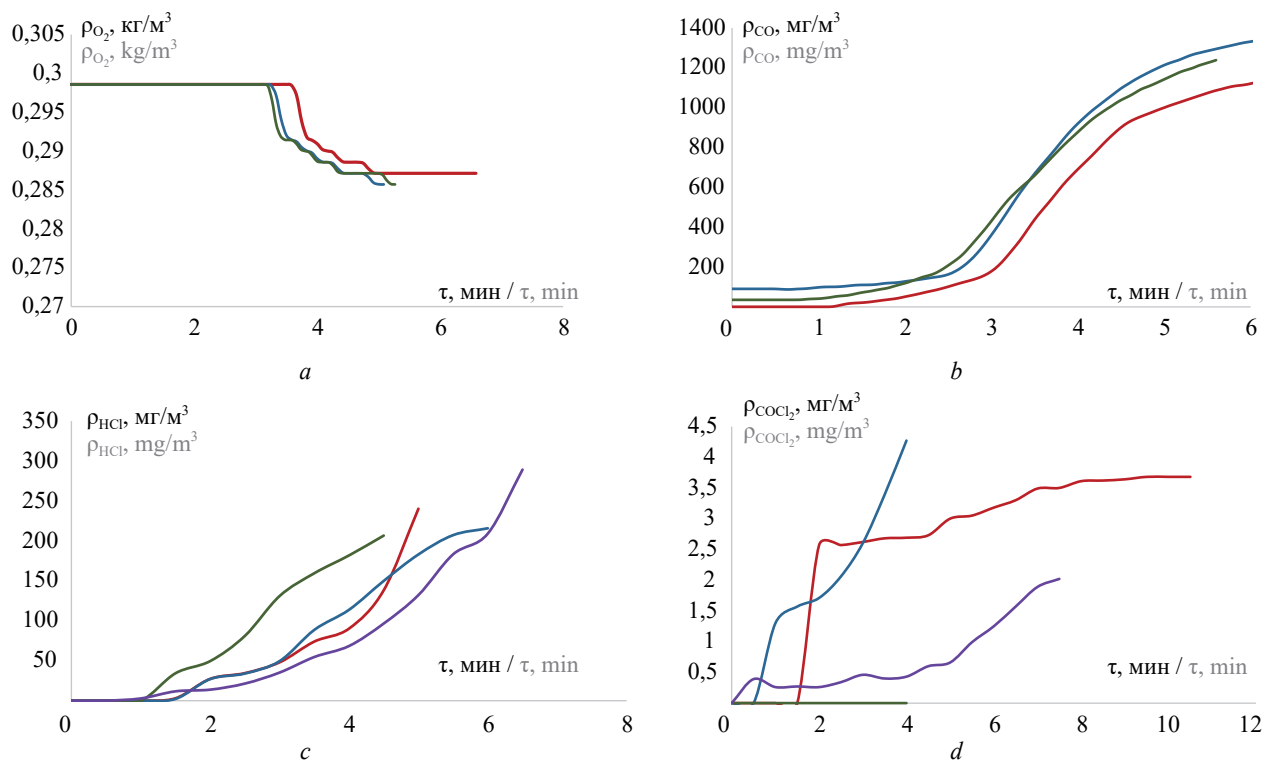
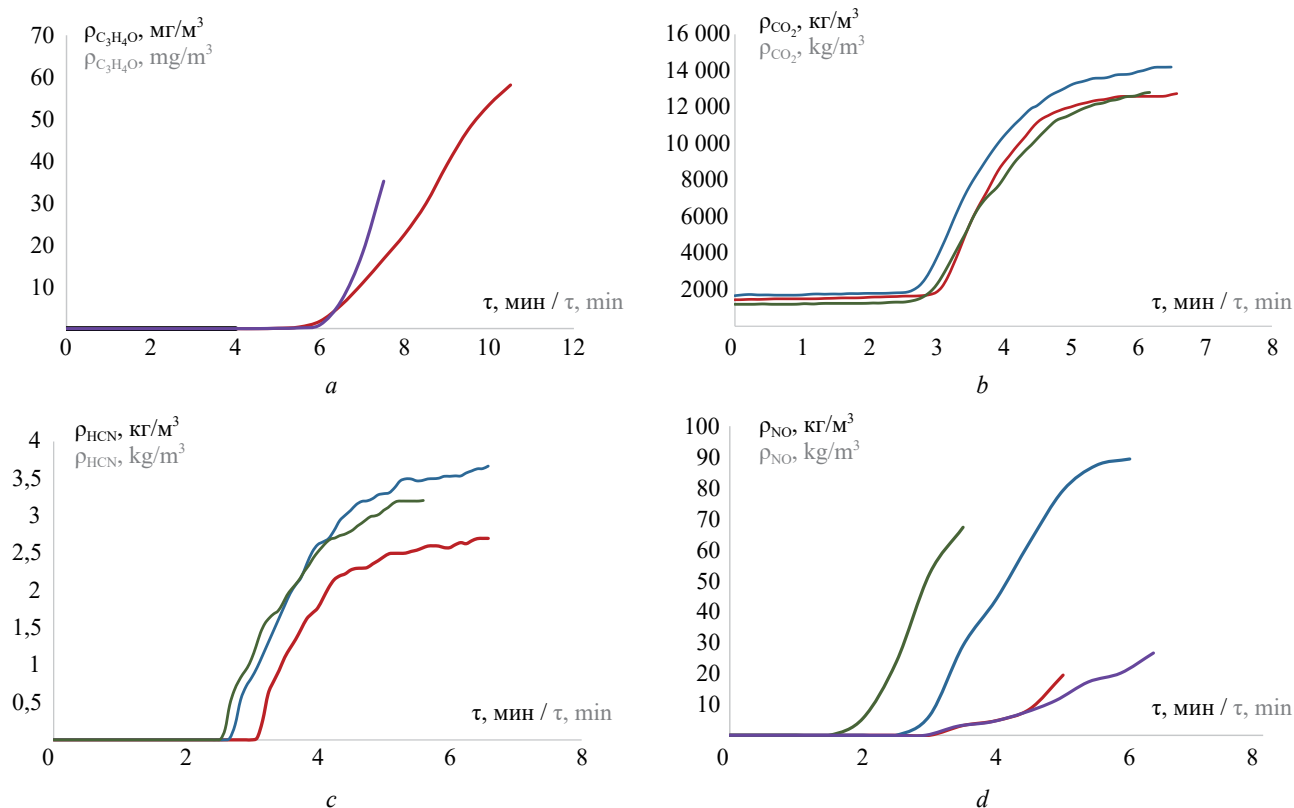
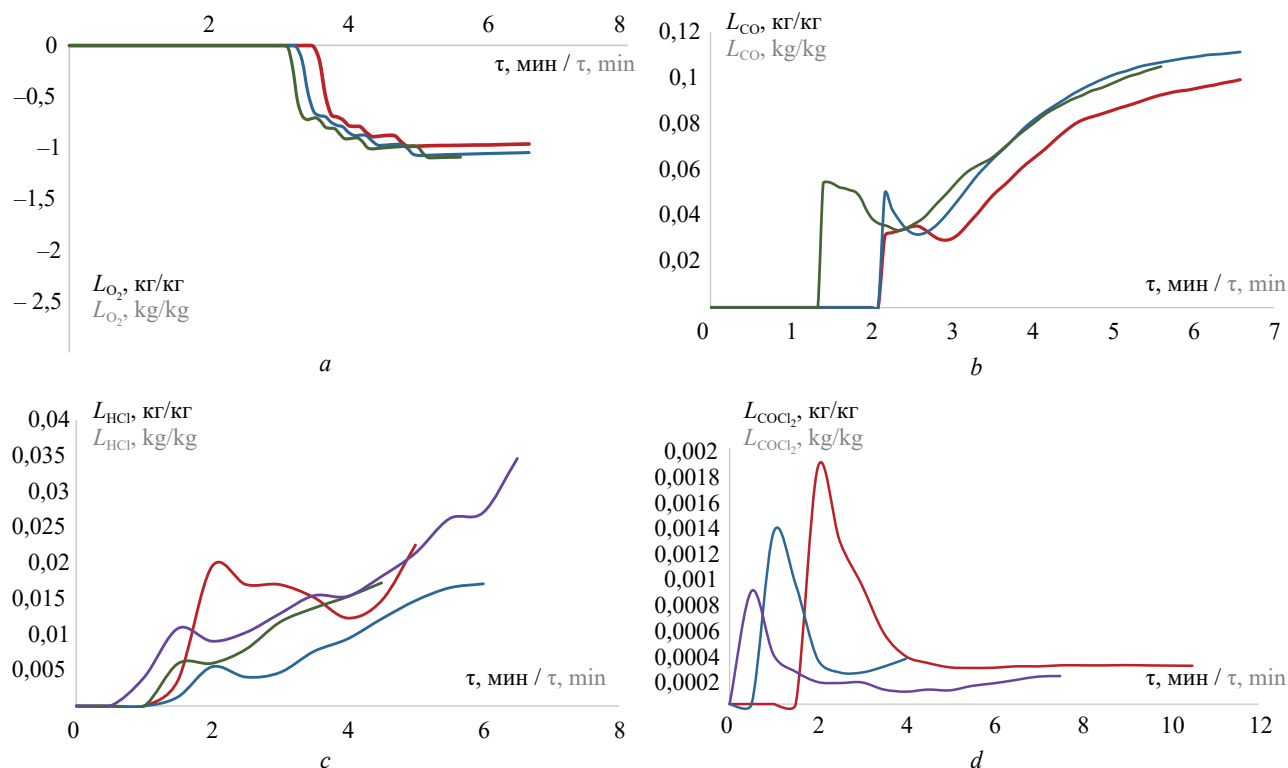


Рис. 3. Зависимости от времени парциальной плотности кислорода (а), оксида углерода (b), хлороводорода (c) и фосгена (d)  
Fig. 3. Time dependences of the partial density of oxygen (a), carbon monoxide (b), hydrogen chloride (c), and phosgene (d)



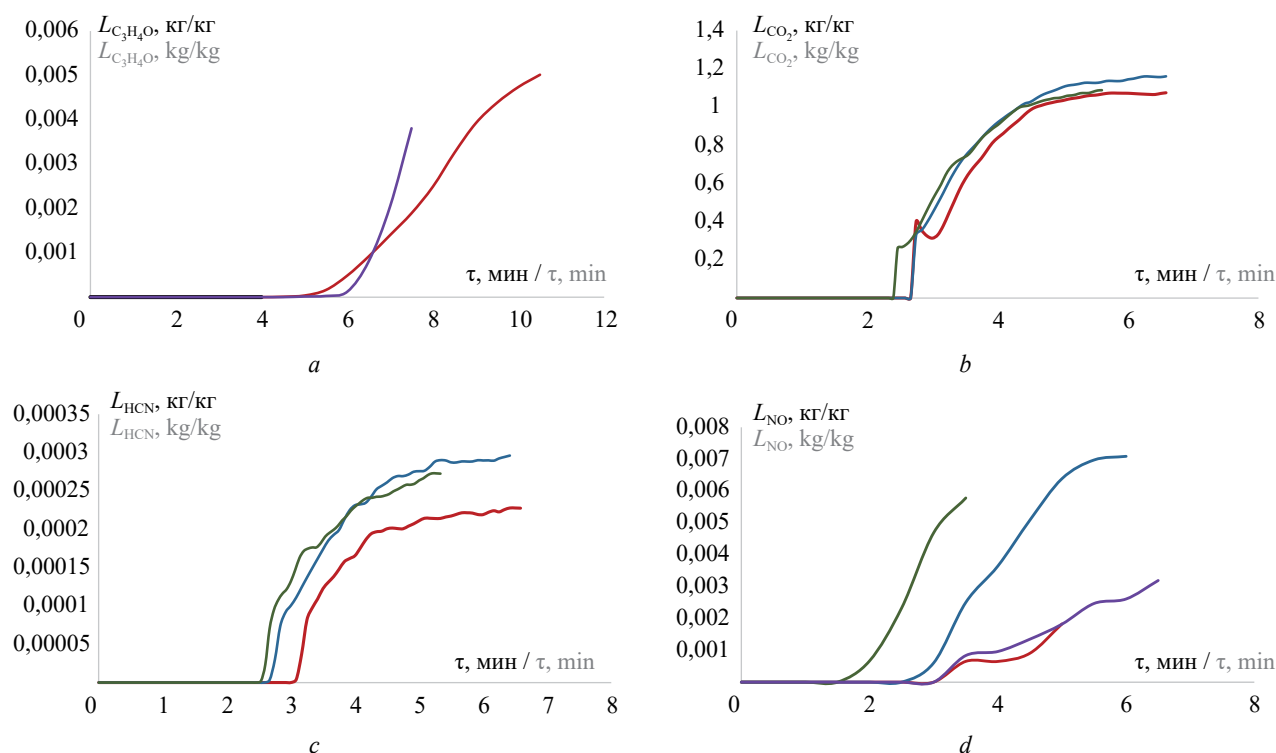
**Рис. 4.** Зависимости от времени парциальной плотности акролена (а), двуоксида углерода (б), циановодорода (с) и монооксида азота (д)

Fig. 4. Time dependences of the partial density of acrolein (a), carbon dioxide (b), and hydrogen cyanide (c) and nitrogen monoxide (d)



**Рис. 5.** Зависимости от времени удельного коэффициента поглощения кислорода (а), а также удельных коэффициентов образования оксида углерода (б), хлороводорода (с) и фосгена (д)

Fig. 5. Dependences of the specific oxygen absorption coefficient (a) and the specific coefficients of formation of carbon monoxide (b), hydrogen chloride (c), and phosgene (d) on time during combustion of the non-combustible cables fire load



**Рис. 6.** Зависимости от времени удельных коэффициентов образования акролеина (а), двуоксида углерода (b), циановодорода (с) и монооксида азота (d)  
**Fig. 6.** Time dependences of the specific coefficients of formation of acrolein (a), carbon dioxide (b), and hydrogen cyanide (c) and nitrogen monoxide (d)

Зависимости удельного коэффициента поглощения кислорода и удельных коэффициентов образования токсичных газов от времени испытаний приведены на рис. 5 и 6.

Обнаружено, что диоксид азота не образуется в значимом количестве.

Для применения нового подхода к обработке исходных данных по математическому моделированию динамики опасных факторов пожара [18], учитывающему масштабный фактор (отличие размеров

маломасштабной экспериментальной установки и реального помещения), получены зависимости парциальных плотностей токсичных газов от изменения парциальной плотности кислорода. Эти зависимости приведены в табл. 1.

Зависимости от времени массы образцов ( $m$ , г) и удельной массовой скорости выгорания ( $\psi$ , кг/с·м<sup>2</sup>) представлены на рис. 7.

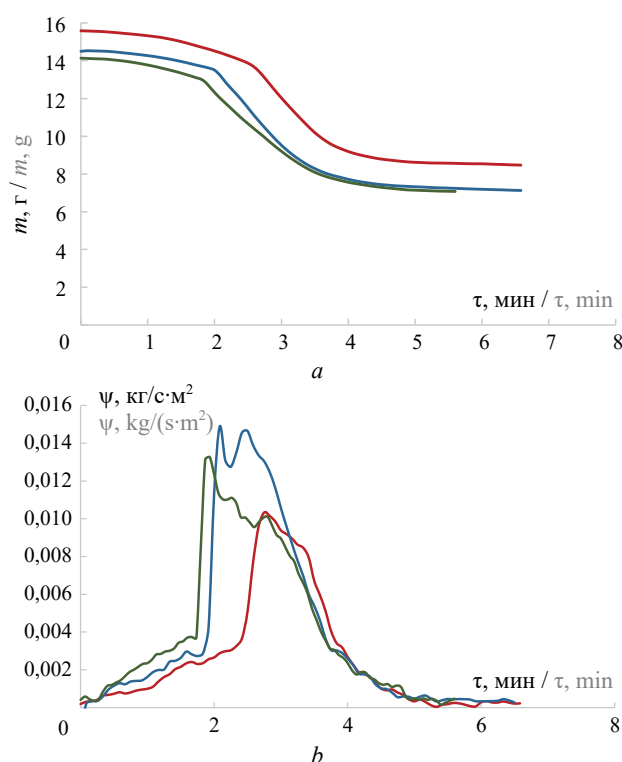
В табл. 2 представлены полученные максимальные значения удельных коэффициентов образова-

**Таблица 1.** Зависимости парциальных плотностей токсичных газов от изменения парциальной плотности кислорода, образующихся при горении горючей нагрузки кабелей, не распространяющих горение

**Table 1.** Dependences of the partial densities of toxic gases on the change in the partial density of oxygen formed during combustion of the combustible load “Non-combustible cables”

Токсичный газ Toxic gas	Параметры Parameters	Кабели, не распространяющие горение Non-combustible cables				
Монооксид углерода Carbon monoxide	$\rho_{CO}$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho_{CO}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,00033	0,00066	0,00099	0,00132
	$\Delta\rho_{O_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\Delta\rho_{O_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Диоксид углерода Carbon dioxide	$\rho_{CO_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho_{CO_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,005	0,010	0,011	0,012
	$\Delta\rho_{O_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\Delta\rho_{O_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,035	0,070	0,0105	0,014

Токсичный газ Toxic gas	Параметры Parameters	Кабели, не распространяющие горение Non-combustible cables				
Хлористый водород Hydrogen chloride	$\rho_{\text{HCl}}$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho_{\text{HCl}}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,00007	0,00014	0,00021	0,00028
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Циановодород Hydrogen cyanide	$\rho_{\text{HCN}}$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho_{\text{HCN}}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,0000017	0,0000033	0,0000035	0,0000037
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Фосген Phosgene	$\rho_{\text{COCl}_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho_{\text{COCl}_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,0000011	0,0000022	0,0000033	0,0000044
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Монооксид азота Nitrogen monoxide	$\rho_{\text{NO}}$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho_{\text{NO}}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,0000225	0,000045	0,0000675	0,00009
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,035	0,070	0,0105	0,014
Акролеин Acrolein	$\rho_{\text{C}_3\text{H}_4\text{O}}$ , кг/м <sup>3</sup> $\rho_{\text{C}_3\text{H}_4\text{O}}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,000015	0,00003	0,000045	0,00006
	$\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , кг/м <sup>3</sup> $\Delta\rho_{\text{O}_2}$ , kg/m <sup>3</sup>	0	0,035	0,070	0,0105	0,014



**Рис. 7.** Зависимости от времени массы образцов (а) и удельной массовой скорости выгорания (б)  
**Fig. 7.** Time-dependent mass of specimens (a) and specific mass rate of burning (b)

ния выделяющихся токсичных газов в сравнении с данными из базы данных горючей нагрузки [19] и работ [1, 20], в которых исследована токсичность кабелей НГ, отличных от данной работы наименований.

Необходимо отметить, что в базе данных горючей нагрузки [19] приведены данные только по трем токсичным газам (СО, СО<sub>2</sub> и НСl).

Из табл. 2 видно, что:

- значения удельных коэффициентов образования СО, СО<sub>2</sub> и НСl, полученные в данной работе и приведенные для электрокабелей в базе данных горючей нагрузки [19], отличаются на величину порядка 70 %;
- величины удельных коэффициентов образования циановодорода, полученные в данной работе и в работах [1, 20], практически совпадают. Анализ результатов экспериментов показал:
- парциальные плотности всех рассматриваемых токсичных газов превышают или соизмеримы с их критическими значениями для человека;
- в образовавшейся при терморазложении газовой смеси присутствуют токсичные газы, которые при их совместном воздействии на человека усиливают свои отдельные токсикологические эффекты (например, СО + НСl, СО + НСN и т.д.).

**Таблица 2.** Максимальные значения удельных коэффициентов образования токсичных газов при терморазложении изоляции кабелей, не распространяющих горение

**Table 2.** Maximum values of specific coefficients of formation of toxic gases during thermal decomposition of non-combustible cable insulation

Токсичный газ Toxic gas	Максимальные значения удельных коэффициентов образования токсичных газов $L$ , кг/кг Maximum values of specific coefficients of formation of toxic gases $L$ , kg/kg			
	данная работа this article	работа [19] the article [19]	работа [1] the article [1]	работа [20] the article [20]
Монооксид углерода Carbon monoxide	0,11	0,13	0,075	0,055
Диоксид углерода Carbon dioxide	1,8	0,65	–	–
Хлористый водород Hydrogen chloride	0,035	0,0245	–	–
Циановодород Hydrogen cyanide	0,0003	–	0,0003	0,00035
Фосген Phosgene	0,0019	–	–	–
Монооксид азота Nitrogen monoxide	0,0072	–	–	–
Акролеин Acrolein	0,005	–	–	–

**Заключение**

Проведенные экспериментальные исследования токсичности продуктов терморазложения изоляции кабелей НГ показали, что образуется смесь токсичных газов (монооксид углерода, диоксид углерода, хлористый водород, циановодород, фосген, диоксид азота и акролеин), которая не учитывается при проведении

пожарно-технических расчетов (например, определение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами).

Полученные новые экспериментальные данные по удельным коэффициентам образования вышеуказанных токсичных газов могут быть использованы при расчете пожарных рисков в помещениях, где используются и производятся кабели НГ.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Пузач С.В., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдрушкиев О.Б. Оценка токсичности не распространяющих горение сигнальных кабелей при пожаре в производственных помещениях // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 5. С. 75–80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80. EDN GDVOGL.
2. Лебедченко О.С. Токсичность газовой среды в помещениях блочного и резервного пультов управления АЭС при пожаре // Безопасность жизнедеятельности. 2024. № 6 (282). С. 52–56. EDN IOSCME.
3. Stec A.A., Hull T.R. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials // Energy and Buildings. 2011. No. 43 (2–3). Pp. 498–506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
4. Каменский М.К., Мецанов Г.И., Фрик А.А. Кабели и провода пожаробезопасного исполнения. Современное состояние и тенденция развития // Кабели и провода. 2017. № 3 (365). С. 30–35. EDN ZRNTWX.
5. Фрик А.А. Исследования и разработка пожаробезопасных кабелей с применением безгалогенных материалов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 163 с. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_008659602/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008659602/)
6. An W., Tang Y., Liang K., Wang T., Zhou Y., Wen Z. Experimental study on flammability and flame spread characteristics of polyvinyl chloride (PVC) cable // Polymers. 2020. No. 12 (12). P. 2789. DOI: 10.3390/polym12122789. EDN YWUYKO.
7. Ke G., Zimeng L., Jinzhang J., Zeyi L., Yisimayili A., Zhipeng Qi. et al. Study on flame spread characteristics of flame-retardant cables in mine // Advances in Polymer Technology. 2020. P. 8765679. DOI: 10.1155/2020/8765679. EDN NYVLOC.
8. Huang X., Zhu H., Peng L., Zheng Z., Zeng W., Bi K. et al. Thermal Characteristics of Vertically Spreading Cable Fires in Confined Compartments // Fire Technology. 2019. No. 55. Pp. 1849–1875. DOI: 10.1007/s10694-019-00833-9. EDN UMIHBS.

9. Wang W., Huo Yu., Kang F, Liu H., Ren H., Yang Bo. et al. Study on hazard of smoke generated by mining cable fires // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2023. No. 150. Pp. 12175–12185. DOI: 10.1007/s10973-023-12136-x. EDN YPARDX.
10. Al-Sayegh W.A., Aljumaiah O., Andrews G.E., Phylatou H.N. PVC Cable Fire Toxicity using the Cone Calorimeter // *Fire Science and Technology : the Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. 2015. Pp. 175–182. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9\_17
11. Lee S.H., Kim M.Ho., Jeong S.Ye., Lee S.K., Lee Ju.E., Lee M.Ch. Fire dynamics simulation in a cable spreading room of a nuclear power plant using fire test results of heat release and toxic gas emission // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. No. 38 (3). Pp. 1517–1532. DOI: 10.1007/s12206-024-0243-5. EDN GOEBUK.
12. Hong N., Jia P., Chen S., Hu Ch., Xia. J., Wang B. et al. Enhancing the fire safety and mechanical performance of EVA/IFR cable materials via MXene by nano-synergistic strategy // *Colloid and Polymer Science*. 2025. No. 303. Pp. 1563–1576. DOI: 10.1007/s00396-025-05445-0
13. Yu J., Sun L., Ma Ch., Qiao Yu, Yao H. Thermal degradation of PVC : a review // *Waste Management*. 2016. No. 48. Pp. 300–314. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.041. EDN WSADOH.
14. Pauluhn J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration × time conundrum of lethality and incapacitation // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2016. No. 80. Pp. 173–182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017
15. Лебедченко О.С., Пузач С.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б. Образование токсичных газов при терморазложении негорючих сигнальных кабелей во время пожара в помещении : мат. VIII Рос. нац. конф. по теплообмену. В 2 т. Т. 1. М. : МЭИ, 2022. С. 226–227. EDN XKVWBE.
16. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety*. 2019. № 28 (5). С. 19–26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26. EDN XXDNNG.
17. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б. Определение парциальной плотности циановодорода при пожарах на объектах энергетики // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2020. № 3. С. 5–10. DOI: 10.25257/FE.2020.3.5-10. EDN SACGTB.
18. Пузач С.В., Болдрушкиев О.Б., Сулейкин Е.В. Новый подход к определению показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2021. № 2. С. 39–46. DOI: 10.25257/FE.2021.2.39-46. EDN DFMSNJ.
19. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с. EDN QNKWAX.
20. Пузач С.В., Акперов Р.Г., Лебедченко О.С., Болдрушкиев О.Б. Токсичность изоляции не распространяющих горение силовых кабелей оборудования систем безопасности АЭС при пожаре в помещениях // *Полимерные материалы пониженной горючести : сб. мат. XI Междунар. конф. Волгоград : ВГТУ, 2023. С. 181–185. EDN ZASGOJ.*

## REFERENCES

1. Puzach S.V., Akperov R.G., Lebedchenko O.S., Boldrushkiev O.B. Evaluation of the toxicity of flame retardant signal cables in case of fire in the industrial premises. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 5:75-80. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80. EDN GDVOGL. (rus).
2. Lebedchenko O.S. Toxicity of the gas medium in rooms of NPP main and standby control panels in case of fire. *Life Safety*. 2024; 6(282):52-56. EDN IOSCME. (rus).
3. Stec A.A., Hull T.R. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. *Energy and Buildings*. 2011; 43(2-3):498-506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
4. Kamensky M.K., Meshchanov G.I., Frick A.A. Fire-safe cables and wires. Current status and development trends. *Cables and wires*. 2017; 3(365):30-35. EDN ZRNTWX. (rus).
5. Frick A.A. Research and development of fire-safe cables using halogen-free materials : *dissertation of a candidate of technical sciences*. Moscow, 2016; 163. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_008659602/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008659602/) (rus).
6. An W., Tang Y., Liang K., Wang T., Zhou Y., Wen Z. Experimental study on flammability and flame spread characteristics of polyvinyl chloride (PVC) cable. *Polymers*. 2020; 12(12):2789. DOI: 10.3390/polym12122789. EDN YWUYKO.

7. Ke G., Zimeng L., Jinzhang J., Zeyi L., Yisimayili A., Zhipeng Qi. et al. Study on flame spread characteristics of flame-retardant cables in mine. *Advances in Polymer Technology*. 2020; 2020:8765679. DOI: 10.1155/2020/8765679. EDN NYVLOC.
8. Huang X., Zhu H., Peng L., Zheng Z., Zeng W., Bi K. et al. Thermal Characteristics of Vertically Spreading Cable Fires in Confined Compartments. *Fire Technology*. 2019; 55:1849-1875. DOI: 10.1007/s10694-019-00833-9. EDN UMIHBS.
9. Wang W., Huo Yu., Kang F., Liu H., Ren H., Yang Bo. et al. Study on hazard of smoke generated by mining cable fires. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2023; 150:12175-12185. DOI: 10.1007/s10973-023-12136-x. EDN YPARDX.
10. Al-Sayegh W.A., Aljumaiah O., Andrews G.E., Phylatou H.N. PVC Cable Fire Toxicity using the Cone Calorimeter. *Fire Science and Technology : the Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. 2015; 175-182. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9\_17
11. Lee S.H., Kim M.Ho., Jeong S.Ye., Lee S.K., Lee Ju.E., Lee M.Ch. Fire dynamics simulation in a cable spreading room of a nuclear power plant using fire test results of heat release and toxic gas emission. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024; 38(3):1517-1532. DOI: 10.1007/s12206-024-0243-5. EDN GOEBUK.
12. Hong N., Jia P., Chen S., Hu Ch., Xia J., Wang B. et al. Enhancing the fire safety and mechanical performance of EVA/IFR cable materials via MXene by nano-synergistic strategy. *Colloid and Polymer Science*. 2025; 303:1563-1576. DOI: 10.1007/s00396-025-05445-0
13. Yu J., Sun L., Ma Ch., Qiao Yu., Yao H. Thermal degradation of PVC : a review. *Waste Management*. 2016; 48:300-314. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.041. EDN WSADOH.
14. Pauluhn J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration  $\times$  time conundrum of lethality and incapacitation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2016; 80:173-182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017
15. Lebedchenko O.S., Puzach S.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B. Formation of toxic gases during thermal decomposition of non-combustible signal cables during a fire in a room : *Proceedings of the 8th Russian National Conference on Heat Transfer. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, MPEI, 2022; 226-227. EDN XKVWBE. (rus).*
16. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B. Defining the specific formation coefficient and the critical partial density of hydrogen cyanide and carbon monoxide during a fire indoors. *Pozharovzryvbezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(5):19-26. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.19-26. EDN XXDNNG. (rus).
17. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B. Determination of hydrogen cyanide partial density at power facilities fires. *Fires and Emergencies: Prevention and Elimination*. 2020; 3:5-10. DOI: 10.25257/FE.2020.3.5-10. EDN SACGTB. (rus).
18. Puzach S.V., Boldrushkiev O.B., Suleikin E.V. A new approach to determining the toxicity index under the joint impact of hydrogen cyanide and carbon monoxide during a fire in the room. *Fires and emergencies: prevention, elimination*. 2021; 2:39-46. DOI: 10.25257/FE.2021.2.39-46. EDN DFMSNJ. (rus).
19. Puzach S.V. *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005; 336. EDN QNKWAX. (rus).
20. Puzach S.V., Akperov R.G., Lebedchenko O.S., Boldrushkiev O.B. Toxicity of insulation of flame-retardant power cables of NPP safety system equipment during indoor fires. *Polymeric materials of low flammability : Collection of materials of the XI international conference*. Volgograd, VSTU, 2023; 181-185. EDN ZASGOJ. (rus).

Поступила 19.08.2025, после доработки 03.11.2025;

принята к публикации 04.11.2025

Received August 19, 2025; Received in revised form November 03, 2025;

Accepted November 04, 2025

### Информация об авторах

**ПУЗАЧ Сергей Викторович**, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ResearcherID: U-2907-2019; AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

### Information about the authors

**Sergey V. PUZACH**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Honored Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Boris Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ResearcherID: U-2907-2019; AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000000172341339; e-mail: puzachsv@mail.ru

**ЛЕБЕДЧЕНКО Ольга Сергеевна**, д.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; AuthorID: 770128, ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

**АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Olga S. LEBEDCHENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; AuthorID: 770128; ORCID: 0000-0001-5375-2167; e-mail: ol-26@mail.ru

**Ruslan G. AKPEROV**, Cand. Sci. (Eng.), Associate professor, Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

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

*The authors declare no conflicts of interests.*