



<https://elibrary.ru/ngfciz>

УДК 544.452

DOI: 10.33075/2220-5861-2023-3-79-86

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАКРЫТОМ ОБЪЕМЕ

Т.П. Макарова, А.Н. Батуро, Ю.Н. Безбородов

ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
РФ, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1  
E-mail: [tattomakarova@yandex.ru](mailto:tattomakarova@yandex.ru)

В статье представлены результаты экспериментального исследования горения керосина и этилового спирта в закрытом объеме. Кратко описана разработанная лабораторная установка для проведения исследований. Получены и проанализированы параметры газовой смеси, образующейся при горении легковоспламеняющихся жидкостей, получены математические уравнения, описывающие динамику роста температуры. Результаты проведенных исследований позволят оценить пожарную опасность веществ при горении в закрытом объеме, а научно-обоснованные данные позволят в дальнейшем разработать мероприятия по обеспечению пожарной безопасности на производственных и складских объектах, что приведет к уменьшению пожаров, а также к снижению ущерба, наносимого обществу и окружающей среде.

**Ключевые слова:** пожары, пожарная опасность веществ, закрытые помещения, закрытый объем.

Поступила в редакцию: 19.07.2023. После доработки: 08.08.2023.

**Введение.** Пожары на производственных и складских объектах характеризуются значительным материальным ущербом, большой площадью горения, трудностями в тушении, человеческими жертвами. Также в результате горения на техногенных объектах происходит загрязнение атмосферы, по причине выхода наружу различных токсичных продуктов горения. В связи с техническим прогрессом, число таких объектов ежегодно растёт. На предприятиях производственного и складского назначения обращается и осуществляется

хранение современных взрыво- и пожароопасных веществ, состав которых зачастую неизвестен. Пожаровзрывоопасность таких зданий сохраняется, что отражено в статистических данных по пожарам.

Самый крупнейший пожар за 2022 год произошел на складе OZON, площадь которого составила 20 тыс. кв. м. (рис. 1). Пожар быстро распространялся, и подразделениям пожарной охраны долго не удавалось его потушить. Пострадали 13 человек, 1 погибший [1].



**Рис. 1.** Фотография с места пожара на складе OZON в 2022 году [1]

**Fig. 1.** A photo from the scene of the OZON warehouse fire in 2022 [1]

Система обеспечения пожарной безопасности в связи с высокими темпами развития торговли и производства должна постоянно совершенствоваться. Помимо разработки современных систем обнаружения и тушения пожара, важным остается разработка организационно-технических и профилактических мероприятий для предупреждения возникновения опасных ситуаций. Мероприятия основываются на научно-обоснованных данных, включающих в том числе и физико-химические аспекты горения современных веществ и материалов при различных условиях.

В силу особенностей производственных и складских объектов, на них могут быть созданы условия для протекания горения при недостатке кислорода. Такое горение характерно для полностью закрытых объемов, помещений, где закрыты или вообще отсутствуют проемы, а также отсутствует вентиляция. То есть такая система, в которой может возникнуть и развиваться пожар, считается закрытой термодинамической системой, исключающей обмен воздухом и энергией с окружающей средой.

Настоящая статья посвящена исследованию горения веществ в закрытом объеме. В качестве объекта исследования были испытаны легковоспламеняющиеся жидкости: керосин и этиловый спирт. Экспериментальные исследования позволят получить параметры горения в закрытом объеме легковоспламеняющихся жидкостей. Понимание характера горения веществ в закрытом объеме позволит в дальнейшем разработать организационно-технические мероприятия, направленные на снижение числа случаев возникновения пожаров в условиях недостатка кислорода и, как следствие, снизить наносимые ущербы обществу и окружающей среде.

**Теоретическая часть.** Настоящее исследование направлено на анализ контролируемых и расчетных параметров горения легковоспламеняющихся жидкостей в закрытом объеме. Под закрытым объемом понимается закрытая термодинамическая

система, исключающая доступ воздуха и обмен энергией с окружающей средой.

Изучением горения веществ и динамикой пожаров в закрытом объеме преимущественно занимаются зарубежные ученые. Теоретически динамика пожаров описана в некоторых работах [2, 3], где определены характерные особенности для развития горения в закрытых помещениях:

- 1) высокая температура газовой среды;
- 2) скопление продуктов неполного сгорания в припотолочной зоне, которые являются токсичными и пожаровзрывоопасными;
- 3) пониженная концентрация кислорода;
- 4) высокое давление внутри закрытого объема.

Данные особенности возникают по причине отсутствия обмена теплом с окружающей средой и тем, что горение протекает при недостатке кислорода и является неполным. Вышеперечисленные особенности теоретически основаны на базовых законах физики (термодинамики).

Пожар, протекающий в условиях недостатка кислорода представляет собой определенную опасность. В таких помещениях могут возникать опасные явления, в случае внезапного вскрытия проемов или разрушения ограждающих строительных конструкций, что приводит к доступу кислорода в область горения. Одним из таких явлений является обратная тяга – дефлаграционное горение газовой смеси. Зарубежные исследователи экспериментально изучают данное явление [4, 5] и было выявлено, что опасность представляют именно скапливающиеся в верхней части продукты горения, нагретые до высокой температуры. Также исследователи [4] подтвердили необходимость испытания «реальных» веществ и материалов, используемых в повседневной жизни в помещениях различного функционального назначения, что позволит расширить представление о горении в закрытом пространстве.

В работе [6] проводились исследования горения жидкости в бассейне в закрытом пространстве и измерялись параметры: массовая скорость сгорания, температура газа, концентрация кислорода, коэффициент светопропускания на разных уровнях и выявлены характерные особенности слоев внутреннего объема. Проведены исследования [7] в герметичной камере с метанолом в качестве горючего вещества, для изучения влияния давления и концентрации кислорода. Результаты показали, что скорость горения снижается при уменьшении концентрации кислорода. Большая работа проведена в [8], где проведен теоретический анализ и обоснована динамика заполнения закрытого отсека дымом. Другие исследователи преследовали специальные цели, например, варьировали размеры отсека или изучали горение в специальных объектах.

Среди отечественных исследователей, математическим обоснованием изменения параметров газовой среды при горении внутри герметичных, закрытых объемов занимается Никитин Е.В. В работах [9, 10] доказано, что изменение давления газовой среды внутри герметичного (закрытого) объема является перспективным в оценке основных параметров развития пожара. Была выявлена корреляция между максимальной скоростью нарастания давления внутри отсека и такими параметрами, как: площадь горения (удельная тепловая мощность) и продолжительность свободного развития пожара [11], массовая скорость горения [12] и др. Выявленные зависимости характерны для полностью герметичных отсеков, тогда как утверждает сам автор остается неясным, каким образом осуществлять контроль изменения давления для негерметичных отсеков, которыми являются в том числе и помещения.

Существующие исследования предполагали изучение параметров при горении некоторых горючих жидкостей (метанол) и газов (метан, пропан, гептан), используемых на специализированных объектах. Исследователями не ставилась задача оценки пожарной опасности веществ. Для более

широкого понимания динамики горения веществ в закрытом объеме необходимо исследовать спектр веществ, составляющих нагрузку помещений. В связи с этим был разработан лабораторный стенд, позволяющий исследовать параметры горения твердых и жидких веществ в закрытом объеме, для оценки их опасности.

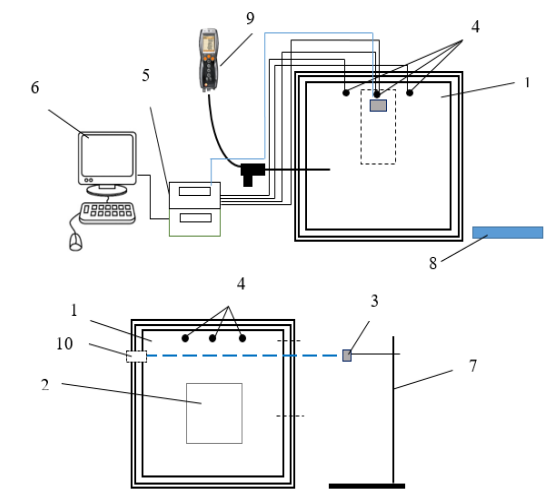
**Экспериментальное оборудование.** Испытания легковоспламеняющихся жидкостей проводились в лабораторном стенде, представленном в виде закрытого металлического короба размерами 50×50×50 см с приборами для контроля параметров газовой среды и лабораторными весами (рис. 2). Внутренняя отделка испытательной камеры выполнена из вермикулитовых плит толщиной 20 мм.

**Результаты экспериментов.** Для достоверности полученных значений эксперименты повторялись 5 раз и проводились в специальной емкости диаметром 8 см. Жидкость поджигалась от пламени газовой горелки, и при достижении развитого горения дверца камеры закрывалась. Для анализа использовались среднеарифметические значения.

На рис. 3, 4 представлена диаграмма изменения температуры верхнего газового слоя в течение времени эксперимента для этилового спирта и керосина соответственно. Динамика изменения разделена на два этапа: 1 – интенсивное горение; 2 – догорание с дальнейшим остыванием. Второй этап условно состоит из 3 стадий: «циклическое» догорание, затухание, остывание до комнатной температуры. Интенсивное горение характеризуется высокой скоростью горения и нарастанием температуры газовой смеси верхнего слоя камеры до максимального значения. Реакция горения является экзотермической. После достижения максимальной температуры начинается вторая стадия с «циклического» догорания. Наступает данный этап по причине того, что в точке горения достигается предельное содержание кислорода, необходимого для горения вещества. Поэтому из внутреннего объема камеры начинается потребление

ние кислорода, что соответствует показаниям газоанализатора, и горение происходит циклично. Пламя практически гаснет и разгорается вновь с поступлением порции кислорода. Данный этап характеризуется эндотермическими процессами, снижением скорости горения. В результате энергии становится недостаточно для поддер-

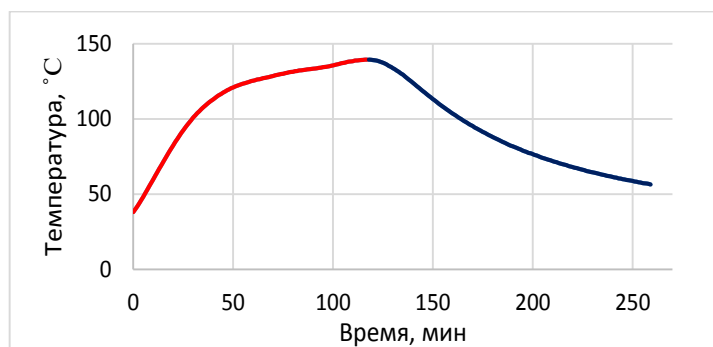
жания горения, и пламя гаснет (наступает этап затухания). Из представленных данных видно, что горение этилового спирта сопровождается нагреванием газовой смеси в верхней части испытательной камеры до 139°C, тогда как при горении керосина – до 127°C.



1–испытательная камера; 2–смотровое окно; 3–источник излучения; 4–термопары;  
5–приемно-контрольное устройство; 6–ПК; 7–штатив лабораторный;  
8 – устройство для измерения массы; 9 – прибор для измерения концентрации кислорода,  
10 – приемник излучения.

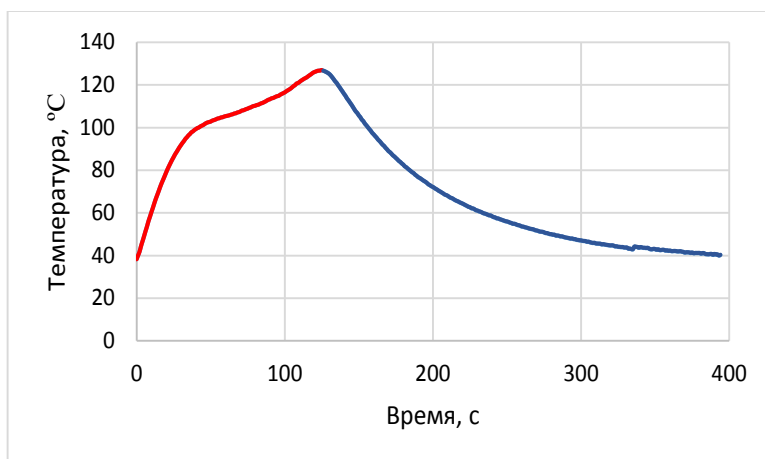
**Рис. 2.** Схема лабораторного стенда по исследованию горения веществ в закрытом объеме

**Fig. 2.** Schematic diagram of the laboratory stand for investigation of combustion of substances in an enclosed volume



**Рис. 3.** Диаграмма изменения температуры газового слоя при горении этилового спирта в течение времени эксперимента

**Fig. 3.** Diagram of gas layer temperature change during ethyl alcohol combustion during the time of the experiment

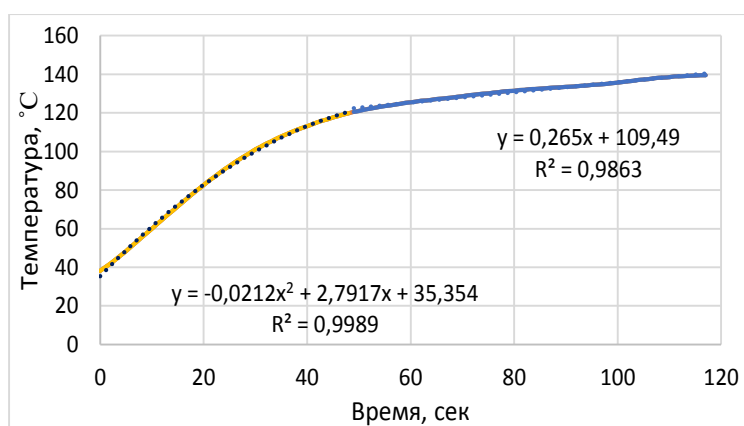


**Рис. 4.** Диаграмма изменения температуры газового слоя при горении керосина в течение времени эксперимента

**Fig. 4.** Diagram of gas layer temperature change during kerosene combustion during the time of the experiment

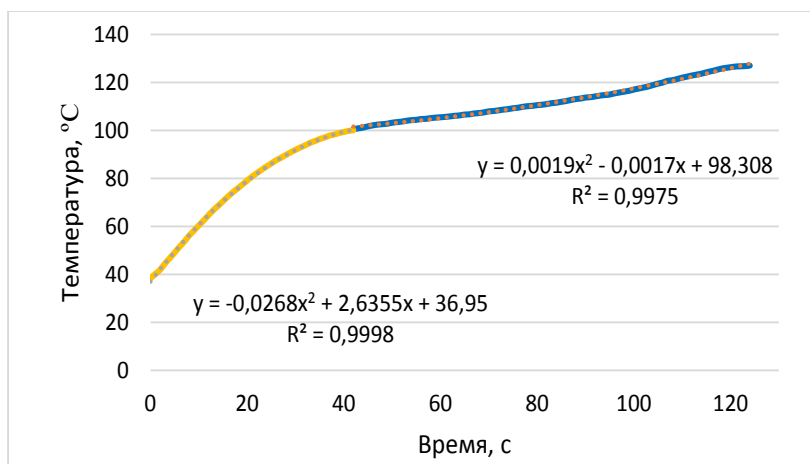
Согласно проведенным экспериментам, максимальная скорость горения, а соответственно и прирост температуры с выделением продуктов горения, происходит на первой стадии. Математическое описание первой стадии позволит проанализировать кинетику развития горения для каждого из веществ. Согласно [4] именно стадия интенсивного горения определяет дальнейшее развитие пожара в случае внезапного вскрытия проема. Поэтому на рис. 5, 6

представлены графики изменения температуры при интенсивном горении этилового спирта и керосина соответственно. Для математической обработки функции была проведена аппроксимация, полученные данные с достаточно высокими коэффициентами детерминации представлены на рис. 5, 6. Согласно полученным функциям видно, что прирост температуры при горении спирта происходит быстрее, чем при горении керосина.



**Рис. 5.** Диаграмма изменения температуры газового слоя при интенсивном горении этилового спирта в закрытом объеме

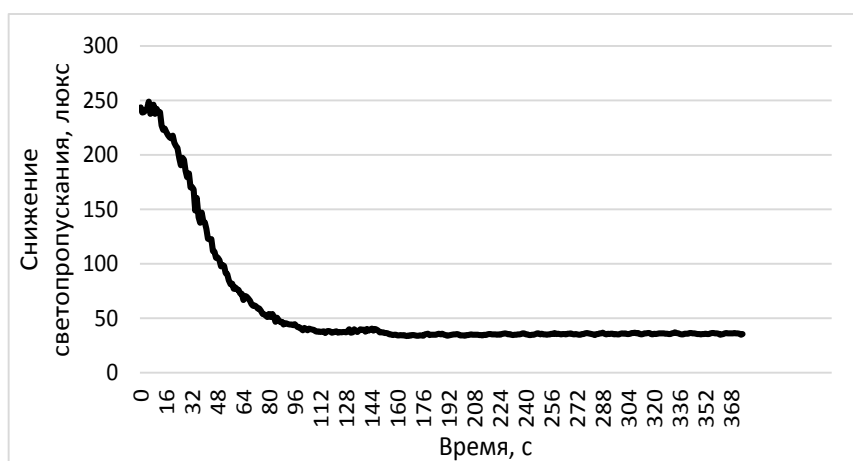
**Fig. 5.** Diagram of gas layer temperature change during intensive combustion of ethyl alcohol in a closed volume



**Рис. 6.** Диаграмма изменения температуры газовой слоя при интенсивном горении керосина в закрытом объеме  
**Fig. 6.** Diagram of gas layer temperature change during intensive combustion of paraffin in a closed volume

Результат контроля снижения светопропускания при проведении эксперимента по исследованию горения керосина представлен на рис. 7. Полученная зависимость позволяет определить, с какой скоростью продукты горения наполняют верхнюю часть камеры. Данный параметр индивидуален для каждого вещества. Ис-

следование горения спирта продемонстрировало ограничение использования лазера для веществ, горение которых сопровождается выделением невидимых продуктов. Поэтому необходимо использование других видов излучения для комплексного контроля выхода веществ во время эксперимента.



**Рис. 7.** Диаграмма снижения светопропускания при горении керосина в закрытом объеме  
**Fig. 7.** Diagram of light transmission decrease during paraffin combustion in a closed volume

Для выявления зависимостей между регистрируемыми и вычисляемыми параметрами, исследование жидких веществ проводилось в два этапа: увеличение массы вещества и увеличение площади емкости. По результатам исследования изменения массы веществ при горении в закрытом объеме не было установлено зависимостей и изменений параметров. Увеличение площади, в свою очередь, приводило к увеличению значений, что позволило выявить зависимости по исследуемым параметрам. В результате экспериментов установлено, что основным параметром, определяющим массу потребленного кислорода, скорость прироста температуры, снижение свето-пропускания, является массовая скорость выгорания веществ.

**Заключение.** На основании проведенного исследования выявлено, что горение этилового спирта в закрытом объеме сопровождается более быстрым нагреванием верхнего слоя камеры и до гораздо больших температур, чем горение керосина. Выявлено, что скорость горения является основным параметром, от которого зависят величины других параметров состояния газовой среды. Горение спирта представляет большую опасность по сравнению с керосином, так как создаются условия для дальнейшего развития горения, в случае вскрытия проема и внезапного доступа кислорода в зону реакции. Для оценки пожарной опасности продуктов горения необходимы дальнейшие исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://ren.tv/longread/1008041-chto-izvestno-o-krupnom-pozhare-na-sklade-ozon-v-podmoskove> (дата обращения 25.01.2023).
2. *Драйздейл Д.* Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат. 1990. 424 с.
3. *Bengtsson L.G., Hardestam P.* Enclosure fires. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency. 2001. P. 192.
4. *Wu C.L.* Experimental study of back-draught using solid fuels. 2019. P. 16–18.
5. *Fleischmann C.M., Pagni P.J., Williamson R.B.* Exploratory backdraft experiments, *Fire Technol.* 29 (1993) 298–316. doi:10.1007/BF01052526.
6. *Zhang J., Lu S., Li Q., Yuen R., Yuan M., Li C.* Impacts of Elevation on Pool Fire Behavior in a Closed Compartment: A Study Based upon a Distinct Stratification Phenomenon, *Journal of Fire Science*, 31 (2013), 2, pp. 173–188.
7. *Bailey J.L., Williams F.W., Tatem P.A.F.* Methanol Pan Fires in an Enclosed Space: Effect of Pressure and Oxygen Concentration, Report No. NRL/MR/6180-93-7310. Naval Research Laboratory. Washington DC. USA. 1993.
8. *Zhang J., Lu S., Li Q., Yuen R.K.K., Chen B., Yuan M., Li C.* Smoke Filling in Closed Compartments with Elevated Fire Sources, *Fire Safety Journal*. 54 (2002). Nov., P. 14–23.
9. *Никитин Е.В.* К вопросу о приближенной оценке площади горения в герметичном отсеке корабля // Межвузовский научно-технический сборник «Надежность и живучесть технических средств корабля». Севастополь. СВВМИУ. 1988. С. 101–106.
10. *Nikitin Y.V.* Indirect method of estimating a fire pool area in a closed compartment // *Journal of fire sciences*. 1999. Т. 17. No. 1. P. 57–70.
11. *Никитин Е.В., Кириченко А.В., Сошкин П.А.* Исследование динамики выравнивания воздушного давления в замкнутой системе отсеков для оценки параметров развития пожара // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 3(97). С. 37–50.
12. *Nikitin Y.V.* Variations of mass combustion rate with oxygen concentration and gas pressure of a milieu // *Journal of Fire Sciences*. 1998. Т. 16. №. 6. P. 458–467.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMBUSTION OF FLAMMABLE LIQUIDS  
IN A CLOSED VOLUME**

**T.P. Makarova, A.N. Batur, Yu.N. Bezbzorodov**

FSBEE HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia,  
RF, Krasnoyarsk Region, Zheleznogorsk, Severnaya St., 1.  
E-mail: [tattomakarova@yandex.ru](mailto:tattomakarova@yandex.ru)

The paper presents the results of the experimental study of combustion of paraffin and ethyl alcohol in a closed volume. The laboratory setup developed for the research is briefly described. The study of physicochemical aspects of combustion of modern substances and materials in various conditions is relevant due to the preservation of fire danger and increase in the number of fires, especially at storage facilities. The development of organizational and technical solutions to ensure fire safety at such facilities implies a reduction in the fire incidence, which in turn will reduce the damage to society and the environment.

**Keywords:** fires, fire hazard of substances, closed premises, closed volume.

**REFERENCES**

1. <https://ren.tv/longread/1008041-cto-izvestno-o-krupnom-pozhare-na-sklade-ozon-v-podmoskove> (January 25, 2023).
2. *Drajzdejł D.* Vvedenie v dinamiku pozharov (Introduction to the fire dynamics). Moscow: Strojizdat, 1990, 424 p.
3. *Bengtsson L.G. and Hardestam P.* Enclosure fires. Karlstad, Sweden: *Swedish Rescue Services Agency*, 2001, 192 p.
4. *Wu C.L.* Experimental study of backdraught using solid fuels. 2019, pp. 16–18.
5. *Fleischmann C.M., Pagni P.J., and Williamson R.B.* Exploratory backdraft experiments. *Fire Technol.* 29 (1993) 298–316, doi:10.1007/BF01052526.
6. *Zhang J., Lu S., Li Q., Yuen R., Yuan M., and Li C.* Impacts of Elevation on Pool Fire Behavior in a Closed Compartment: A Study Based upon a Distinct Stratification Phenomenon, *Journal of Fire Science*, 31 (2013), 2, pp. 173–188.
7. *Bailey J.L., Williams F.W., and Tatem P.A.F.* Methanol Pan Fires in an Enclosed Space: Effect of Pressure and Oxygen Concentration, Report No. NRL/MR/6180-93-7310, *Naval Research Laboratory*, Washington DC, USA, 1993.
8. *Zhang J., Lu S., Li Q., Yuen R.K.K., Chen B., Yuan M., and Li C.* Smoke Filling in Closed Compartments with Elevated Fire Sources, *Fire Safety Journal*, 54 (2002), Nov., pp. 14–23.
9. *Nikitin E.V.* K voprosu o priblizhennoj ocenke ploshchadi goreniya v germetichnom otseke korablya (On the issue of an approximate assessment of the combustion area in the sealed compartment of the ship). *Mezhvuzovskij nauchno-tehnicheskij sbornik «Nadezhnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh sredstv korablya»*, Sevastopol, SVVMIU, 1988, pp. 101–106.
10. *Nikitin Y.V.* Indirect method of estimating a fire pool area in a closed compartment. *Journal of fire sciences*, 1999, Vol. 17, No. 1. pp. 57–70.
11. *Nikitin E.V., Kirichenko A.V., and Soshkin P.A.* Issledovaniye dinamiki vyravnivaniya vozdušnogo davleniya v zamknutoy sisteme otsekov dlya otsenki parametrov razvitiya pozhara (Investigation of the dynamics of air pressure equalization in a closed system of compartments to estimate the parameters of fire development). *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*, 2022, No. 3 (97), pp. 37–50.
12. *Nikitin Y.V.* Variations of mass combustion rate with oxygen concentration and gas pressure of a milieu. *Journal of Fire Sciences*, 1998, Vol. 16, No. 6, pp. 458–467.