

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ В ЗАКРЫТОМ ОБЪЕМЕ

В статье представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию параметров газовой среды при горении древесины, резины и пластика в условиях, исключающих доступ кислорода в область реакции. Для создания условий был разработан лабораторный стенд. Получены графики изменения температуры и снижения светопропускания продуктов горения, скапливающихся в верхней части слоя камеры сгорания. Проанализированы изменения контролируемых параметров и получены корреляционные зависимости между ними. Полученные результаты могут быть использованы в качестве оценочных для построения прогнозных моделей развития пожаров в закрытых помещениях складского назначения, а также для оценки пожарной опасности веществ при горении в закрытом объеме.

**Ключевые слова:** горение, закрытые помещения, закрытый объем, пожарная опасность веществ, методы контроля.

**Введение.** Исследования в области пожарной безопасности предполагают получение расширенного представления об опасности горения веществ, материалов в различных условиях. Горение представляет собой сложный процесс, который зависит от условий и состава горючего вещества. Одним из факторов, влияющих на процесс горения, является доступ кислорода в зону горения. Целью настоящей работы является изучение кинетики горения и параметров газовой среды, образующейся в результате реакции окисления веществ в закрытом объеме. Будут рассмотрены условия проведения экспериментов, интерпретированы результаты, проведен сравнительный анализ контролируемых параметров исследуемых веществ.

На основе полученных данных и проведенных ранее исследований удастся расширить теоретическое понимание горения веществ в закрытом объеме, то есть в условиях, исключающих доступ воздуха.

**Теория.** Горение — физико-химический процесс, сопровождающийся выделением тепла, света и продуктов горения. Характер процесса горения может изменяться в зависимости от наличия либо отсутствия кислорода. Так, пожары, протекающие в открытой среде или в помещении с постоянным доступом воздуха, считаются регулируемыми пожарной нагрузкой [1]. Горение продолжается при избытке кислорода и зависит от количества топлива. Тогда как в условиях недостатка кислорода процесс горения отличен и зависит от окислителя. Такие пожары считаются регулируемыми вентиляцией [1] и протекают в условиях закрытой термодинамической системы, предполагающей отсутствие обмена воздуха и энергии с окружающей средой.

Пожары в закрытых объемах характеризуются следующими особенностями:

1. Повышение температуры газовой среды. Большая часть тепла аккумулируется внутри закрытого объема, так как отсутствует обмен энергией с окружающей средой.

2. Горение материалов внутри помещения при пожарах, регулируемых вентиляцией, считается неполным и сопровождается выделением большого количества СО и других пожароопасных продуктов неполного сгорания.

3. Повышение давления в связи с отсутствием возможности выхода продуктов горения за пределы помещения и высокой температуры, что может привести к разрушению и дальнейшему интенсивному распространению пожара.

4. Пониженная концентрация кислорода является ключевым фактором, определяющим характер горения в закрытом объеме.

Изучением процессов горения в закрытых пространствах занимается относительно небольшое число отечественных ученых. Изменение давления газовой среды внутри герметичного (закрытого) объема является перспективным в оценке параметров развития пожаров [2, 3]. В работах отечественных исследователей путем математических вычислений была выявлена корреляция между максимальной скоростью нарастания давления внутри отсека и такими параметрами, как площадь горения (удельная тепловая мощность) и продолжительность свободного развития пожара [4], массовой скоростью горения [5] 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.

Экспериментальными исследованиями характера горения веществ в закрытом пространстве преимущественно занимались зарубежные ученые [6, 7]. Zhang и др. [8], 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. В [9] проведены исследования в герметичной камере с метанолом в качестве источника возгорания, для изучения влияния давления и концентрации кислорода. И было обнаружено, что массовая скорость горения снижается с уменьшением концентрации кислорода. В работе [10] проведен теоретический анализ и экспериментально обоснована динамика заполнения закрытого отсека дымом. Другие исследователи преследовали специальные цели по изменению размеров отсеков или изучению горения на специализированных объектах, преимущественно с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями. Тогда как пожарную нагрузку помещений составляют природные или композитные твердые вещества и материалы.

Исследователями подтверждается факт, что изучению характера горения в условиях недостатка кислорода должны подвергаться такие виды топлива, которые встречаются в повседневной жизни [11], что позволит оценить опасность обращающихся или хранящихся веществ в закрытых помещениях складского назначения. Для чего разработан лабораторный стенд, позволяющий проводить исследование характера горения твердых веществ в закрытом объеме.

**Лабораторное оборудование.** Для проведения экспериментов был разработан лабораторный стенд (рис. 1), представляющий собой металлический короб (1) размерами 0,5 м×0,5 м×0,5 м, с установленными внутри приборами контроля параметров газовой среды. Внутренняя отделка камеры выполнена негорючими вермикулитовыми плитами толщиной 20 мм для ограничения теплообмена с окружающей средой. Конструкция короба выполнена таким образом, чтобы ограничить доступ кислорода в зону реакции горения. Разработанный стенд позволяет контролировать следующие параметры: температуру газовой среды в верхней части короба, общеобъемную концентрацию кислорода, потерю массы испытываемого образца и снижение светопропускания. Для контроля температуры использовались 4 термопары в верхней части камеры (4). Для контроля общеобъемной концентрации кислорода использовался газоанализатор (9). Снижение светопропускания продуктов горения регистрировалось при помощи источника лазерного излучения (3), проходящего через смотровое окно камеры. Электронные лабораторные весы (8) позволяли фиксировать изменение массы испытываемых образцов до и после экспериментов.

**Объекты исследования.** В рамках настоящего исследования объектом является горючая нагрузка помещений складского назначения. Число таких помещений ежегодно растет, также в них могут быть созданы условия для развития горения без доступа кислорода. Причиной роста таких объектов служит технологический прогресс и развитие различных видов торговли, что предполагает хранение готовой продукции или сырья в больших объемах. Отсюда

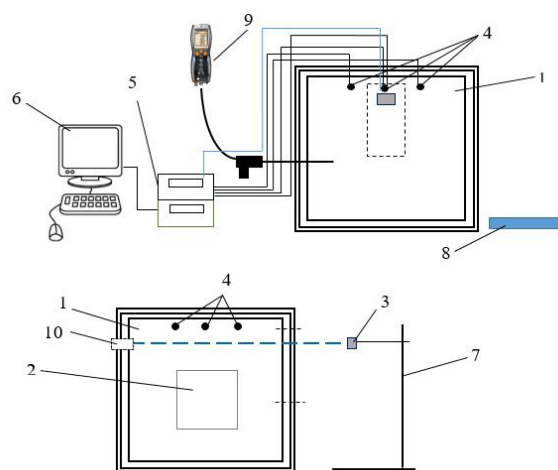


Рис. 1. Схема лабораторного стенда по исследованию процессов горения в закрытом объеме: 1 — испытательная камера; 2 — смотровое окно; 3 — источник излучения; 4 — термопары; 5 — приемно-контрольное устройство; 6 — ПК; 7 — штатив лабораторный; 8 — устройство для измерения массы; 9 — прибор для измерения концентрации кислорода; 10 — приемник излучения

и характерная особенность таких помещений — обращение разнообразных веществ и материалов. К сожалению, число пожаров на таких объектах ежегодно растет, что приносит не только ущерб обществу и государству, но также огромный материальный ущерб и вред окружающей среде [12]. В качестве исследуемого объектов были выбраны следующие материалы, составляющие основной объем пожарной нагрузки в помещениях складского назначения:

1. Резинотехническое изделие — тепло-морозостойкая (далее — ТМКЩ) резина черного цвета [13].

Резинотехнические изделия являются расходным материалом для производства различных деталей (прокладочные, амортизирующие, уплотнительные), элементов (гибкие, транспортные ленты), трубопроводов, товаров общего пользования и т.д. Помимо широкого применения в качестве обоснования выбора объекта исследования явился резонансный пожар, произошедший в г. Красноярске в 2020 году на складе автозапчастей, где также осуществлялось хранение резинотехнических изделий [14].

2. Хвойная древесина.

Хвойная древесина используется во многих областях, включая строительство, производство мебели, бумаги и других изделий. Состав хвойной древесины, соответственно и параметры горения, могут варьироваться в зависимости от вида дерева и даже места произрастания.

3. Пластик (а конкретно, акрилонитрилбутадиенстирол, далее — АБС) — широкое применение в качестве расходного материала конструктивного исполнения бытовой техники. Способен гореть в воздухе.

Для исследования были подготовлены 15 образцов резины, 15 образцов древесины и 9 образцов пластика. Размеры образцов составили 10×2 см, толщина реальная, но не более 1 см. Образцы помещались в держатель, поджигались, и после достижения развившегося горения дверца камеры закрывалась. Предварительная подготовка не осуществлялась,

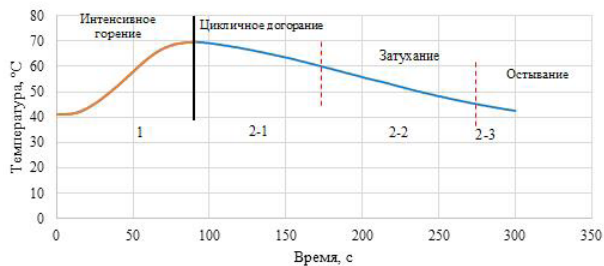


Рис. 2. Диаграмма изменения температуры при горении древесины в течение времени эксперимента

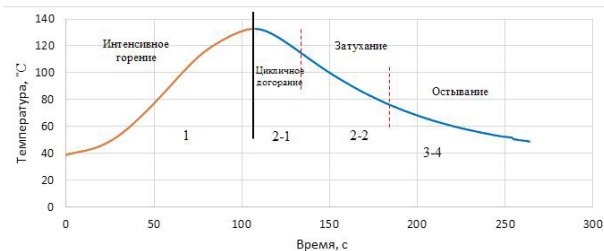


Рис. 3. Диаграмма изменения температуры при горении резины в закрытом объеме в течение времени эксперимента

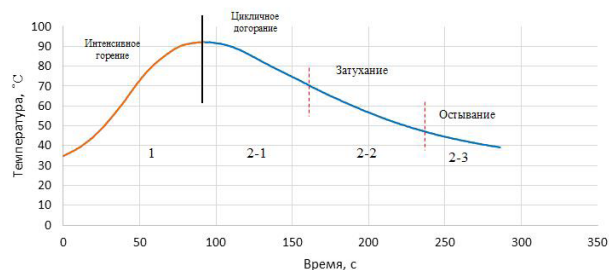


Рис. 4. Диаграмма изменения температуры при горении пластика в закрытом объеме в течение времени эксперимента

образцы выдерживались при комнатной температуре в течение 24 ч.

**Результаты исследований.** На рис. 2–4 представлены диаграммы изменения температуры в течение времени эксперимента для хвойной древесины, резины, пластика. Динамика изменения температуры разделена на 2 этапа. 1 этап — интенсивное горение, второй этап состоит из 3 стадий: 2–1 — «циклическое догорание», 2–2 — затухание и 2–3 — 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 (2–1). 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 кислорода, что соответствует показаниям газоанализатора, горение происходит циклично. Пламя «дышит», практически гаснет и разгорается вновь с поступлением порции кислорода. Данный этап характеризуется эндотермическими процессами, снижением скорости горения.

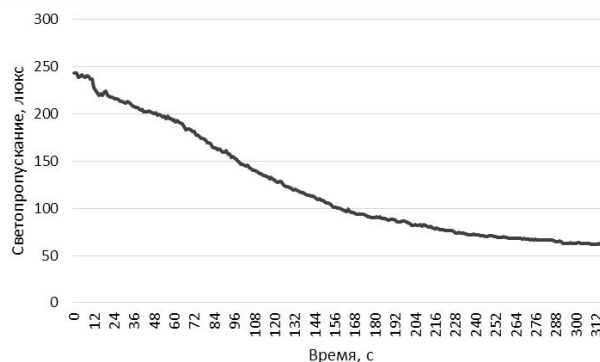


Рис. 5. Снижение светопропускания продуктов горения при исследовании древесины в закрытом объеме

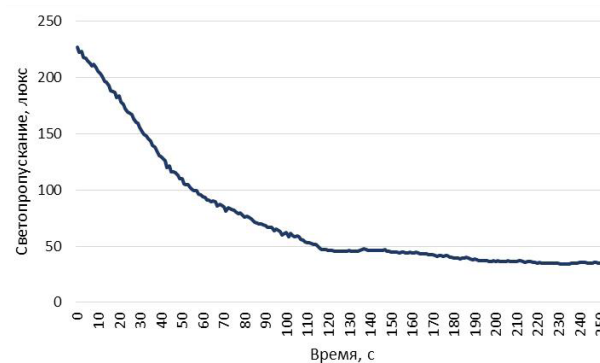


Рис. 6. Снижение светопропускания продуктов горения при исследовании резины в закрытом объеме

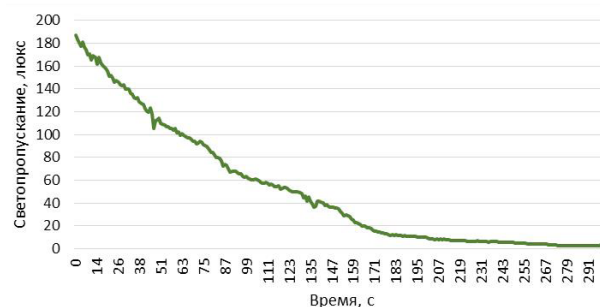


Рис. 7. Снижение светопропускания продуктов горения при исследовании пластика в закрытом объеме

В результате энергии становится недостаточно для поддержания горения и пламя гаснет (наступает этап затухания — 2–2). Так как на рис. 1–3 приведены среднеарифметические значения, соответственно, диапазон стадии затухания — широкий. После затухания испытываемое вещество остывает до комнатной температуры.

Как видно из представленных графиков, характер горения веществ отличается друг от друга: разные максимальные температуры, время наступления стадий и прекращения горения. Поэтому обобщить параметры температур не представляется возможным для всех веществ, что подтверждает необходимость анализа динамики горения веществ в закрытом объеме.

Во время эксперимента регистрировалось снижение светопропускания при использовании лазера, результаты среднеарифметических значений представлены на рис. 5–7. Как видно из представ-

Таблица 1

Скорости снижения светопропускания при горении твердых веществ в закрытом объеме

№ п/п	Вещество	1-я стадия	2-я стадия
1	Древесина	0,95	0,71
2	Резина	1,99	0,51
3	Пластик	1,28	0,67

Таблица 2

Корреляционная матрица параметров горения древесины с учетом увеличения площади образцов

	$m_{\text{сгор } 2}$	$\Delta T$	$\psi$	$\vartheta_T$	$\frac{\Delta E_9}{\Delta t}$
$m_{\text{сгор } 2}$	1				
$\Delta T$	0,990	1			
$\psi$	0,910	0,951	1		
$\vartheta_T$	0,876	0,867	0,703	1	
$\frac{\Delta E_9}{\Delta t}$	0,735	0,848	0,987	0,778	1

ленных графиков, снижение светопропускания, соответственно, и скорость выхода продуктов горения (заполнения верхнего проема продуктами горения) индивидуально для каждого из исследуемых веществ.

При горении пластика выделяется черный дым и светопропускание снижается практически до нуля (рис. 6). Но следует отметить, что цвет продуктов горения не определяет пожарную опасность веществ [1]. В табл. 1 представлены скорости снижения светопропускания газовой среды для исследуемых веществ. Большая часть продуктов горения выделяется на первой стадии, что подтверждается экспериментальными данными. Но для оценки пожароопасности образующейся газовой смеси необходимы дополнительные исследования.

Так как максимальное скопление и выделение продуктов горения наблюдается в первой стадии и газовая смесь нагрета до высоких температур, тогда можно предположить, что этап циклического горения, при котором наблюдается недостаток кислорода, может быть опасным в случае вскрытия проема и доступа кислорода из окружающей среды. В зависимости от концентрации горючих газов и температуры, нагретого слоя доступ кислорода приведет к ускорению скорости горения и может наступить воспламенение газовой смеси верхней части исследуемого объема или помещения.

Для выявления зависимостей между регистрируемыми и вычисляемыми параметрами, исследование твердых веществ проводилось в два этапа: увеличение массы образцов и увеличение площади. 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 ос-

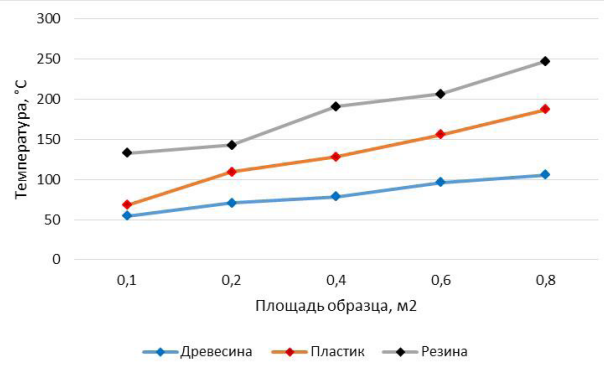


Рис. 8. Графики изменения максимальных температур газовой среды в зависимости от площади сгораемого вещества

Таблица 3

Функции изменения максимальных температур продуктов горения при изменении площади горения образцов

Вещество	Функция	Коэффициент детерминации, $R^2$
Резина	$y = 29,279x + 96,253$	0,964
Пластик	$y = 28,484x + 44,257$	0,9879
Древесина	$y = 12,931x + 42,28$	0,9883

новным параметром, определяющим массу потребленного кислорода, скорость прироста температуры, снижение светопропускания, является усредненная массовая скорость выгорания веществ. Корреляционная зависимость между исследуемыми параметрами на примере древесины представлена в табл. 2.

В табл. 2 представлена корреляционная зависимость следующих параметров:

- 1) масса сгоревшего кислорода  $m_{\text{сгор } 2}$ ;
- 2) прирост температуры ( $\Delta T$ );
- 3) усредненная массовая скорость выгорания ( $\psi$ );
- 4) скорость прироста температуры ( $\vartheta_T$ );
- 5) снижение светопропускания  $\left(\frac{\Delta E_9}{\Delta t}\right)$ .

Далее на рис. 8 представлен сводный график максимальных температур газовой среды при изменении площади горения. Как видно из представленных данных, при горении резины образующаяся газовая среда нагревается до больших температур, нежели древесина или пластик. Нагретая до высоких температур газовая среда с достаточной концентрацией продуктов неполного сгорания может воспламениться в случае внезапного доступа кислорода, что приведет к дефлаграционному горению газозадушной смеси. Построенные графики были аппроксимированы и получены уравнения с достаточно высокими коэффициентами детерминации. Полученные уравнения представлены в табл. 3 и позволяют прогнозировать ожидаемую температуру газовой смеси в зависимости от предполагаемой площади сгораемого вещества в исследуемом объеме.

**Обсуждение результатов. Сравнение полученных результатов с другими исследованиями.** Как



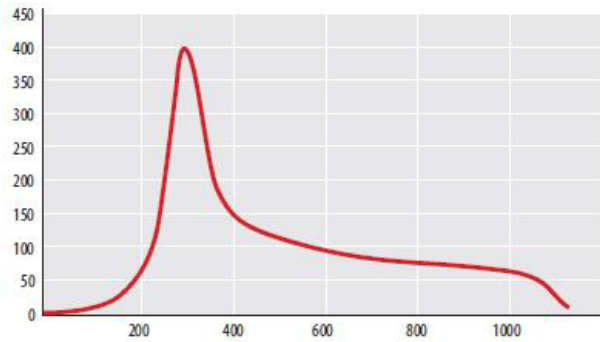


Рис. 9. График зависимости температуры от времени в закрытом помещении [16]

было выявлено в ходе проведенных исследований, массовая скорость выгорания является определяющим параметром в динамике горения, что подтверждается математическими исследованиями [5]. Описанный процесс развития и прекращения горения в настоящей статье экспериментально подтвержден и соответствует положениям, изложенным в [8, 15]. Представленные графики изменения температуры визуально повторяют график (рис. 9), представленный в [16].

Значения температур варьируются в зависимости от используемого топлива. Для конкретного вещества будут свои критические значения температур, что приводит к сложности обобщения температуры, необходимой, например, для возникновения явления обратной тяги.

Обратная тяга — дефлаграционное горение газовой смеси, образующееся при вскрытии проемов помещений, где развивалось горение в условиях, исключающих доступ кислорода. Ряд исследований данного явления представлен в работах [11, 17] и др. Поэтому актуально исследовать кинетику горения, что позволит определить параметры, обобщающие опасность горения веществ в закрытом объеме.

**Ограничение проведенного исследования.** Полученные зависимости и значения, в первую очередь, определяются объемом (лабораторный стенд), в котором были проведены эксперименты. Результаты лабораторных испытаний могут быть использованы в качестве оценочных для моделирования или прогнозирования пожаров в больших объемах. В реальности пожар представляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от множества факторов.

**Заключение.** В данной статье были получены результаты исследования горения твердых веществ в закрытом объеме. Были проведены эксперименты с древесиной, резиной, пластиком; проанализированы контролируемые параметры. Был выявлен опасный диапазон с точки зрения развития дальнейшего развития пожара. Подтверждено, что доступ кислорода и усредненная массовая скорость выгорания являются основными факторами, влияющими на кинетику реакции горения в закрытом объеме.

Проведенное исследование имеет практическое применение для обеспечения пожарной безопасности на объектах складского назначения. В дальнейших исследованиях предполагается обобщать критерии, определяющие опасность горения материалов в условиях закрытого объема.

## Библиографический список

1. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. NFPA, 2004. 262 p.
2. Никитин Е. В. К вопросу о приближенной оценке площади горения в герметичном отсеке корабля // Надежность и живучесть технических средств корабля: межвуз. науч.-техн. сб. Севастополь: СВВМИУ, 1988. С. 101–106.
3. Nikitin Y. V. Indirect method of estimating a fire pool area in a closed compartment // Journal of fire sciences. 1999. Vol. 17, no. 1. P. 57–70. DOI: 10.1177/073490419901700104.
4. 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. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.37-50.
5. 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. P. 458–467. DOI: 10.1177/073490419801600605.
6. Tatem P. A., Williams F. W., Ndubizu C. C. [et al.]. Influence of Complete Enclosure on Liquid Pool Fires // Combustion Science and Technology. 1986. Vol. 45, no. 3–4. P. 185–198. DOI: 10.1080/00102208608923849.
7. Chow W. Studies on Closed Chamber Fires // Journal of Fire Sciences. 1995. Vol. 13, no. 2. P. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201.
8. Zhang J., Lu S., Li Q. [et al.]. Impacts of Elevation on Pool Fire Behavior in a Closed Compartment: A Study Based upon a Distinct Stratification Phenomenon // Journal of Fire Sciences. 2013. Vol. 31, no. 2. P. 173–188. DOI: 10.1177/0734904112460203.
9. Bailey J., Williams F. W., Tatem P. A. Methanol Pan Fires in an Enclosed Space: Effect of Pressure and Oxygen Concentration. Naval Research Laboratory, 1993. 55 p.
10. Zhang J., Lu S. X., Li Q. [et al.]. Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 54. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.003.
11. Wu C. L. Experimental study of backdraught using solid fuels. 2019. 244 p.
12. Хуртина Е. Ю., Мухаметшина Я. М., Нечаева О. А. Влияние вредных веществ на атмосферу в результате горения нефтепродуктов на складе ГСМ // Наука, образование и инновации: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Саратов 13 мая 2016 г. Саратов: МЦИИ «ОМЕГА САЙНС». 2016. Ч. 4. С. 18–21. EDN: VYAYMD.
13. ГОСТ 7338-90. Пластины резиновые и резиноканевые. Технические условия. Введ. 1991–07–01. Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 18 с.
14. Сетевое издание «NGS24.RU» Красноярск онлайн. URL: <https://ngs24.ru/text/incidents/2021/02/04/69749223> (дата обращения: 12.06.2023).
15. Loo A. S. X., Coppalle A., Aîné P. Flame extinction in a ventilation-controlled compartment // Procedia Engineering. 2013. Vol. 62. P. 301–308. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.068.
16. Bengtsson L. G. Enclosure fires. Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2001. 192 p.
17. Fleischmann C. M., Pagni P. J., Williamson R. B. Exploratory backdraft experiments // Fire Technology. 1993. Vol. 29, no. 4. P. 298–316. DOI: 10.1007/BF01052526.

**МАКАРОВА Татьяна Петровна**, адъюнкт факультета заочного и дистанционного обучения Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железногорск.

SPIN-код: 9125-5587

AuthorID (РИНЦ): 1120146

Адрес для переписки: [tattomakarova@yandex.ru](mailto:tattomakarova@yandex.ru)

**БАТУРО Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заместитель начальника академии по научной работе — начальник научно-

технического центра Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железнодорожск.

SPIN-код: 6887-7568

AuthorID (РИНЦ): 814934

Адрес для переписки: batur@ibpsa.ru

**БЕЗБОРОДОВ Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-технического центра Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железнодорожск.

SPIN-код: 5195-4507

AuthorID (РИНЦ): 271274

#### Для цитирования

Макарова Т. П., Батуро А. Н., Безбородов Ю. Н. Результаты исследования горения твердых веществ в закрытом объеме // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 162–168. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-162-168.

Статья поступила в редакцию 30.06.2023 г.

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

UDC 544.452

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-162-168

EDN: PXNKIQ

**T. P. MAKAROVA  
A. N. BATURO  
YU. N. BEZBORODOV**

**Siberian Fire and Rescue  
Academy of the State Fire Service  
of the EMERCOM of Russia,  
Zheleznogorsk, Russia**

## RESULTS OF A STUDY ON COMBUSTION OF SOLIDS IN AN ENCLOSED VOLUME

The paper presents the results of laboratory experiments to study the parameters of the gas environment during the combustion of wood, rubber and plastic under conditions that exclude oxygen access to the reaction area. A laboratory bench has been developed to create the conditions. Graphs of temperature changes and reduction of light transmission of combustion products accumulated in the upper part of the combustion chamber layer have been obtained. Changes of the controlled parameters are analysed and correlation dependences between them are obtained. The results obtained can be used as estimates for building prediction models of fire development in enclosed storage rooms, as well as for assessing the fire hazard of substances when burning in an enclosed volume.

**Keywords:** combustion, enclosed spaces, enclosed volume, fire hazard of substances, control methods.

#### References

1. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. NFPA, 2004. 262 p. (In Engl.).
2. Nikitin E. V. K voprosu o priblizhennoy otsenke ploshchadi goreniya v germetichnom otseke korablya [On the issue of approximate assessment of the combustion area in a sealed compartment of a ship] // Nadezhnost' i Zhivuchest' Tekhnicheskikh Sredstv Korablya. *Reliability and Survivability of the Ship's Technical Equipment*. Sevastopol, 1988. P. 101–106. (In Russ.).
3. Nikitin Y. V. Indirect method of estimating a fire pool area in a closed compartment // *Journal of Fire Sciences*. 1999. Vol. 17, no. 1. P. 57–70. DOI: 10.1177/073490419901700104. (In Engl.).
4. Nikitin Y. V., Kirichenko A. V., 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 compartment system for assessing parameters of a fire

development] // *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Technologies of Technosphere Safety*. 2022. No. 3 (97). P. 37–50. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.37-50. (In Russ.).

5. 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. P. 458–467. DOI: 10.1177/073490419801600605. (In Engl.).

6. Tatem P. A., Williams F. W., Ndubizu C. C. [et al.]. Influence of Complete Enclosure on Liquid Pool Fires // *Combustion Science and Technology*. 1986. Vol. 45, no. 3–4. P. 185–198. DOI: 10.1080/00102208608923849. (In Engl.).

7. Chow W. Studies on Closed Chamber Fires // *Journal of Fire Sciences*. 1995. Vol. 13, no. 2. P. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201. (In Engl.).

8. Zhang J., Lu S., Li Q. [et al.]. Impacts of Elevation on Pool Fire Behavior in a Closed Compartment: A Study Based upon a Distinct Stratification Phenomenon // *Journal of Fire Sciences*. 2013. Vol. 31, no. 2. P. 173–188. DOI: 10.1177/0734904112460203. (In Engl.).

9. Bailey J., Williams F. W., Tatem P. A. Methanol Pan Fires in an Enclosed Space: Effect of Pressure and Oxygen Concentration. Naval Research Laboratory, 1993. 55 p. (In Engl.).
10. Zhang J., Lu S. X., Li Q. [et al.]. Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources // *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 54. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.003. (In Engl.).
11. Wu C. L. Experimental study of backdraught using solid fuels. 2019. 244 p. (In Engl.).
12. Hurtina E. Y., Muhametshina Y. M., Nechaeva O. A. Vliyaniye vrednykh veshchestv na atmosferu v rezul'tate goreniya nefteproduktov na sklade GSM [The influence of harmful substances on the atmosphere as a result of the combustion of petroleum products in a fuel and lubricants warehouse] // *Nauka, Obrazovaniye i Innovatsii. Science, Education and Innovation*. 2016. No. 4. P. 18–21. EDN: VYAYMD. (In Russ.).
13. GOST 7338-90. Plastiny rezinovyie i rezinotkanevyye. Tekhnicheskiye usloviya [Rubber and rubber-fabric sheets. Specifications]. Moscow, 2004. 18 p.
14. Setevoye izdaniye «NGS24.RU» Krasnoyarsk onlayn [Network publication «NGS24.RU» Krasnoyarsk online]. URL: <https://ngs24.ru/text/incidents/2021/02/04/69749223> (accessed: 12.06.2023). (In Russ.).
15. Loo A. S. X., Coppalle A., Aîné P. Flame extinction in a ventilation-controlled compartment // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 62. P. 301–308. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.068. (In Engl.).
16. Bengtsson L. G. Enclosure fires. Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2001. 192 p. (In Engl.).
17. Fleischmann C. M., Pagni P. J., Williamson R. B. Exploratory backdraft experiments // *Fire Technology*. 1993. Vol. 29, no. 4. P. 298–316. DOI: 10.1007/BF01052526. (In Engl.).

**MAKAROVA Tatiana Petrovna**, Adjunct of Correspondence and Distance Learning Faculty, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk.

SPIN-code: 9125-5587

AuthorID (RSCI): 1120146

Correspondence address: [tattomakarova@yandex.ru](mailto:tattomakarova@yandex.ru)

**BATURO Aleksey Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Academy for Scientific Work – Head of the Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk.

SPIN-code: 6887-7568

AuthorID (RSCI): 814934

Correspondence address: [baturo@sibpsa.ru](mailto:baturo@sibpsa.ru)

**BEZBORODOV Yury Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of Research Department of the Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk.

SPIN-code: 5195-4507

AuthorID (RSCI): 271274

#### For citations

Makarova T. P., Baturo A. N., Bezborodov Yu. N. Results of a study on combustion of solids in an enclosed volume // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 162–168. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-162-168.

Received June 30, 2023.

© T. P. Makarova, A. N. Baturo, Yu. N. Bezborodov