



Основан в 2016 году

Выходит 4 раза в год

Научный журнал
Вестник
Университета гражданской защиты
МЧС Беларуси
(Journal of Civil Protection)
Том 8, № 4, 2024

Редакционная коллегия:

главный редактор:

Полевода
Иван Иванович

кандидат технических наук,
доцент

зам. главного редактора:

Гончаренко
Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Платонов
Александр Сергеевич

кандидат физико-математических
наук, доцент

Редакционный совет:

Ковтун Вадим Анатольевич, доктор технических наук, профессор – председатель; Богданова Валентина Владимировна, доктор химических наук, профессор – зам. председателя; Акулов Артем Юрьевич, кандидат технических наук (Россия); Байков Валентин Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Барановский Николай Викторович, кандидат физико-математических наук (Россия); Бирюк Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Бордак Сергей Сергеевич, кандидат военных наук; Волочко Александр Тихонович, доктор технических наук, профессор; Волянин Ежи, доктор технических наук, профессор (Польша); Иваницкий Александр Григорьевич, кандидат технических наук, доцент; Иванов Юрий Сергеевич, кандидат технических наук; Ильюшонок Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Каван Степан, доктор технических наук (Чехия); Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, доцент (Россия); Камлюк Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Карпиленья Николай Васильевич, доктор военных наук, профессор; Кремень Маркс Аронович, доктор психологических наук, профессор; Кудряшов Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент; Кузьмицкий Валерий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент; Лебедева Наталья Шамильевна, доктор химических наук, доцент (Россия); Лешенюк Николай Степанович, доктор физико-математических наук, профессор; Мурзич Игорь Константинович, доктор военных наук, профессор; Пасовец Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент; Поздеев Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор (Украина); Соколов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор (Россия); Тихонов Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Тур Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор; Фурманов Игорь Александрович, доктор психологических наук, профессор; Чень Цзяньго, доктор технических наук, профессор (Китай); Шарипханов Сырым Дюсенгазиевич, доктор технических наук (Казахстан).

Учредитель – Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»

Решением коллегии Высшей аттестационной комиссии № 18/8 от 9 декабря 2016 г.
журнал включен в перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1835 от 19 сентября 2016 г.

Журнал включен в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по психологическим, техническим (по научным направлениям – безопасность в чрезвычайных ситуациях; пожарная и промышленная безопасность; гражданская оборона) и военным (по научному направлению – гражданская оборона) наукам.

С декабря 2023 г. журнал включен в российский перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по 5 научным специальностям отрасли технических наук: 1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, 2.10.1. Пожарная безопасность, 2.10.2. Экологическая безопасность, 2.10.3. Безопасность труда, 3.2.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Ответственность за подбор и точность приведенных данных, а также за использование сведений, не подлежащих открытой публикации, несут авторы опубликованных материалов.

Статьи, поступающие для публикации в журнале, рецензируются.

Полная или частичная перепечатка, размножение, воспроизведение или иное использование опубликованных материалов допускаются с обязательной ссылкой на журнал «Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси».

Адрес редакции: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск

Контактные телефоны: +37517 340-53-93 (главный редактор)

+37517 341-32-99

Сайт Университета гражданской защиты: www.ucsp.by

Email редакции: vestnik@ucsp.by

ISSN 2519-237X (print)

ISSN 2708-017X (online)

© Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Пожаробезопасность и взрывозащита. Огнестойкость строительных материалов

Журов М.М. О роли генераций гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих составов для тушения пожаров 389

Кудряшов В.А., Дробыш А.С. Особенности применения полимерных композитных материалов и конструкций в строительстве 398

Аварийно-спасательная техника, оборудование и экипировка. Тренажерная техника

Полевода И.И., Кобяк В.В., Линник Д.А., Опекун Е.В., Пивоваров А.В., Бузук А.В., Коробочка Д.Н. Массогабаритная модель электромобиля для отработки навыков ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий 411

Материалы и вещества, применяемые в сфере предупреждения и ликвидации ЧС, производстве техники. Технологии их применения

Богданова В.В., Кобец О.И., Рева О.В. Влияние рецептурного состава металлофосфатных огнезамедлительных систем и модифицирующих добавок на устойчивость огнезащитной отделки полиэфирных тканей к гидролизной обработке.... 423

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д., Лихоманов А.О., Журов М.М. Регрессионная модель прогнозирования коэффициента растекания пленкообразующих огнетушащих составов по поверхности горючей жидкости от соотношения их компонентов..... 437

Промышленная безопасность. Повышение надежности технических объектов и оборудования. Охрана труда

Крецу Р.М., Рыбаков А.В. Энтропийный анализ чрезвычайных ситуаций техногенного характера: методология и практическое применение 451

Закрута М.С. Применение методов анализа рисков HAZOP/HAZID в системе управления пожарной и промышленной безопасностью 462

Подготовка специалистов в сфере предупреждения и ликвидации ЧС. Обучение населения по вопросам безопасности жизнедеятельности

Маршалко О.В., Панасевич В.А., Цинкевич О.И. Оценка уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи у руководителей и работников органов и организаций 472

Правила предоставления статей 481

CONTENTS

Fire safety and explosion protection of buildings and structures. Fire resistance of building materials

Zhurov M.M. On the role of generations of heterophase inhibiting and phlegmatizing compositions for fire extinguishing 389

Kudryashov V.A., Drobysh A.S. Features of application of polymer composite materials and structures in construction 398

Emergency rescue techniques, equipment and outfit. Training equipment

Palevoda I.I., Kobyak V.V., Linnik D.A., Opekun E.V., Pivovarov A.V., Buzuk A.V., Korobochka D.N. Mass-size model of an electric vehicle for practicing skills of elimination of consequences of road accidents 411

Materials and substances used for emergency prevention and elimination, as well as equipment production. Application technologies of these materials

Bogdanova V.V., Kobets O.I., Reva O.V. Influence of the formulation of metal phosphate fire-retardant systems and modifying additives on the resistance of fire-retardant finishing of polyester fabrics to hydrolysis treatment 423

Ivanov I.Yu., Navrotskiy O.D., Likhomanov A.O., Zhurov M.M. Regression model for predicting the effectiveness of flow of film-forming fire extinguishing compositions over the surface of combustible liquid from the ratio of their components 437

Industrial safety. Improving the reliability of technical facilities and equipment. Labor protection

Kretsu R.M., Rybakov A.V. Entropy analysis of technogenic emergencies: methodology and practical application 451

Zakruta M.S. Application of HAZOP/HAZID risk analysis methods in fire and industrial safety management system 462

Training of specialists in the sphere of emergency prevention and elimination. Training of the population in life safety

Marshalko O.V., Panasevich V.A., Tsinkevich O.I. Assessing the level of development of first aid competencies among managers and employees of agencies and organizations 472

Rules of submitting articles for publication 481

О РОЛИ ГЕНЕРАЦИЙ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ИНГИБИРУЮЩИХ И ФЛЕГМАТИЗИРУЮЩИХ СОСТАВОВ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

Журов М.М.

Цель. Изучить особенности и условия появления генераций гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих составов при тушении пожаров, а также установить взаимосвязь энергии реакции горения с температурой горения и температурой потухания.

Методы. Анализ, сравнительная оценка механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих составов.

Результаты. На основе проведенного анализа механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих составов установлено, что не изучена роль генераций гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих составов при тушении пожаров с учетом тепловой теории потухания и полной температурно-энергетической схемы реакции горения. Показана взаимосвязь энергии реакции горения с температурой горения и температурой потухания. Предложено требуемую интенсивность подачи огнетушащих составов рассчитывать посредством значений критической скорости химической реакции, а в случае применения одновременно ингибирующих и флегматизирующих составов учитывать влияние появления их генераций на достижение предельных параметров тушения пожаров.

Область применения исследований. Современные подходы к разработке огнетушащих составов целевого назначения. Разработка инновационных огнетушащих составов.

Ключевые слова: тепловая теория потухания, ингибирующие и флегматизирующие составы, тушение пожаров, энергия связи, радикалы, радикально-цепной механизм.

(Поступила в редакцию 24 июля 2024 г.)

Введение

Пожар, как правило, сопровождается диффузионным пламенным горением, которое без прекращения подачи паров горючего может быть погашено с помощью ингибиторов и флегматизаторов [1, с. 231]. В зоне пламени генерации гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих составов при тушении пожаров появляются при радикально-цепных реакциях. Такие генерации могут образовываться при протекании гомофазных или гетерофазных реакций, последние по механизму могут быть [2, с. 137]:

- некаталитическими;
- радикально-цепными;
- гомогенно-каталитическими.

Особенностью гетерофазных процессов является необходимость переноса реагентов из одной фазы в другую за счет массопередачи. При этом в зависимости от относительной скорости химической реакции и массопередачи существует несколько областей гетерофазных реакций, различающихся своими закономерностями, кинетическими моделями и методикой исследования, которые усложняются по сравнению с гомогенными гомофазными процессами. По фазовому состоянию исходной системы гетерофазные процессы можно разделить на два типа:

- 1) исходная система однофазная;
- 2) исходная система состоит не менее чем из двух фаз.

Для прерывания радикально-цепной реакции горения особый интерес представляют гетерофазные реакции, которые могут протекать как в объеме горения, так и на поверхности огнетушащих веществ.

Генерации гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов – комплексная дисперсная многокомпонентная система, образованная в зоне горения

и состоящая из ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов. Соответственно, для генераций гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов важно понимать условия их образования при протекании гомогенных гетерофазных и гетерогенных гетерофазных реакций.

Основная часть

Существует два общих метода генерации определенных радикалов, необходимых для реакции [3, с. 573]:

1) образование молекулы, содержащей необходимый фрагмент, которая может подвергаться гомолизу или превращаться в радикалы с помощью окислительно-восстановительной реакции;

2) разложение инициатора с образованием реакционноспособных радикалов, которые затем превращают органический субстрат в радикалы путем отщепления или присоединения.

Для гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов в зоне реакции горения возможно протекание одновременно гетерогенных и гомогенных реакций, которые могут уменьшать скорость протекания радикально-цепной реакции горения. С точки зрения кинетики радикально-цепных реакций выделяют четыре принципиальных группы реакций, участвующих в процессе [4, с. 16–164]:

1) реакции зарождения, приводящие к образованию свободных валентностей при взаимодействии насыщенных молекул;

2) реакции продолжения цепей, в которых при взаимодействии радикала со стабильной молекулой происходит образование нового радикала и новой стабильной молекулы;

3) реакции разветвления цепей, в которых взаимодействие радикала с насыщенной молекулой приводит к увеличению свободных валентностей;

4) реакции обрыва цепей, при которых взаимодействие двух радикалов между собой либо радикала с поверхностью приводит к исчезновению свободной валентности.

Существующая теория химической связи, химической реакции и катализа предполагает, что основной энергетический вклад в энергию ковалентной химической связи вносит так называемая обменная энергия, обусловленная в первую очередь квантово-механическими эффектами (спариванием электронов с разными спинами) [5, с. 9]. Зарождение цепной реакции горения сопровождается разрывом связей в молекуле одного из реагентов посредством энергии, подводимой в виде тепла. Такой способ проведения реакции называют термическим. Поскольку обратная гомолизу реакция рекомбинации свободных атомов и радикалов происходит при каждом столкновении и имеет нулевую энергию активации, при гомолитическом расщеплении молекулы энергия активации равна тепловому эффекту [$E_{\text{акт}} = Q$]. Это позволяет представить константу скорости k таким уравнением [6, с. 108]:

$$k = A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} = A \cdot e^{-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}}, \quad (1)$$

где A – предэкспоненциальный множитель (коэффициент пропорциональности, который указывает долю активных молекул);

Q – тепловой эффект (энергия активации) химической реакции зарождения цепной реакции горения, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T – температура, К.

При изменении энергии активации отношение констант скоростей химической реакции при фиксированной температуре ($T_1 = T_2 = T$) с учетом формулы (1) можно рассчитать из уравнения:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = -\frac{E_{\text{акт}2} - E_{\text{акт}1}}{RT}. \quad (2)$$

В случае постоянного значения энергии активации $E_{\text{акт}}$ отношение констант скоростей химической реакции при различных температурах T_1 и T_2 с учетом формулы (1) также можно рассчитать из уравнения:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = -\frac{E_{\text{акт}}(T_2 - T_1)}{RT_1 T_2}. \quad (3)$$

Следует отметить, что в каждом интервале времени скорость реакции v (моль/(л·с)) непостоянна и, соответственно, для каждого момента времени характерна истинная скорость реакции. Истинная скорость реакции представляет собой первую производную от концентрации C (моль/л) по времени τ (с) [7, с. 5]:

$$v = \pm \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta C}{\Delta\tau} = \pm \frac{dC}{d\tau}. \quad (4)$$

На скорость химических реакций влияют следующие факторы:

- природа веществ;
- концентрации веществ (давление – для газофазных реакций);
- температура;
- энергия активации;
- катализаторы;
- дисперсность вещества – для гетерогенных процессов.

Относительную устойчивость молекул при фиксированной температуре позволяют оценивать значения их энергий активации. Авторы теории активированного комплекса считают, что энергия активации необходима реагирующим молекулам не для разрыва старых связей, а для достижения неустойчивой конфигурации активированного комплекса [5, с. 19]. В нем электронные оболочки атомов во взаимодействующих молекулах определенным образом деформированы в направлении формирования новых химических связей, а прежние связи ослаблены. Схематично активированный комплекс на примере реакции водорода и йода представлен на рисунке 1 [5, с. 27].

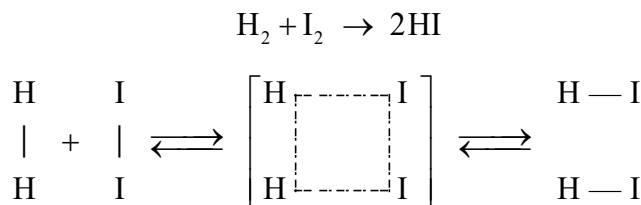


Рисунок 1. – Схема активированного комплекса на примере реакции водорода и йода

Образование в зоне пламенного горения активированного комплекса представляет особый интерес, т.к. возникающие по механизму активированного комплекса генерации ингибирующих и флегматизирующих составов могут повысить эффективность пожаротушения за счет их образования в зоне пламенного горения. При этом для уменьшения скорости реакции горения (торможения) можно также увеличить высоту энергетического активационного барьера для стадий с участием радикалов, образующихся в результате окисления горючих веществ.

На пожаре в пламенной зоне реакции горения протекают по радикально-цепному механизму [4, с. 210], поэтому для эффективного тушения пожаров необходимо правильно оказывать воздействие на определяющую стадию цепной реакции горения. Кинетические схемы разветвленных цепных реакций имеют большое количество элементарных стадий и активных радикалов, но особый интерес с учетом характера диффузионного турбулентного пламенного горения на реальных пожарах представляют стадии образования таких продуктов реакции, как H_2O и CO_2 , которые всегда присутствуют в продуктах горения.

Для оценки вклада каждой стадии в общий тепловой эффект реакции горения и проведения экспериментальных исследований по определению эффективности тушения с помощью ингибирующих и флегматизирующих составов в качестве объектов исследования выбраны водород и пропан, которые в продуктах горения содержат H_2O и CO_2 . Расчеты тепловых эффектов реакций горения водорода и пропана с учетом энтальпии образования веществ и с учетом вклада каждой из стадий образования H_2O и CO_2 на основании значений энергий связи [8] представлены ниже:

$$2H_2 + 3,76N_2 + O_2 = 2H_2O + 3,76N_2 + Q_H$$

$$Q_H(H_2) = [2 \cdot (241,84) - 0] / 2 = 241,84 \text{ кДж/моль}$$

$$C_3H_8 + 3,76N_2 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O + 3,76N_2 + Q_H$$

$$Q_H(H_2) = [3 \cdot (393,5) + 4 \cdot (241,84) - 109,4] / 1 = 2038,46 \text{ кДж/моль}$$

Расчеты теплового эффекта реакции горения водорода с учетом вклада каждой из стадий образования H_2O на основании значений энергий связи [8]:

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O + Q_H$$

$$Q_H(H_2) = -\Delta H(H_2) = -(436 + 1/2 \cdot 498 - (495 + 435)) = 716 - 465 = 245 \text{ кДж/моль}$$

$$H_2 + O_2 = 2OH + Q_1$$

$$Q_1 = [2 \cdot 435 - 436 - 498] = -64 \text{ кДж/моль}$$

$$2HO + H_2 = 2H_2O + Q_2$$

$$Q_2 = 2 \cdot (495 + 435) - 436 - 2 \cdot 435 = 554 \text{ кДж/моль}$$

$$Q_H(H_2) = (Q_1 + Q_2) / 2 = (554 - 64) / 2 = 490 / 2 = 245 \text{ кДж/моль}$$

Расчеты теплового эффекта реакции горения пропана с учетом вклада каждой из стадий реакции образования CO_2 на основании значений энергий связи [8]:

$$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O + Q_H$$

$$Q_H(C_3H_8) = -\Delta H(C_3H_8) = 4 \cdot (495 + 435) + 3 \cdot (1072 + 803) - 5 \cdot 498 - 2 \cdot 376 - 8 \cdot 423 = 2719 \text{ кДж/моль}$$

$$C_3H_8 + O_2 = C_3H_6 + 2OH + Q_1$$

$$Q_1 = [2 \cdot 435 - 2 \cdot 423 - 498] = -474 \text{ кДж/моль}$$

$$C_3H_6 + 2OH = C_3H_4 + 2H_2O + Q_2$$

$$Q_2 = 2 \cdot (495 + 435) - 2 \cdot 423 - 2 \cdot 435 = 144 \text{ кДж/моль}$$

$$C_3H_4 + O_2 = 3C + 2H_2O + Q_3$$

$$Q_3 = 2 \cdot (495 + 435) - 4 \cdot 423 - 2 \cdot 376 - 498 = -1082 \text{ кДж/моль}$$

$$3C + 3O_2 = 3CO_2 + Q_4$$

$$Q_4 = 3 \cdot (1072 + 803) - 3 \cdot 498 = 4131 \text{ кДж/моль}$$

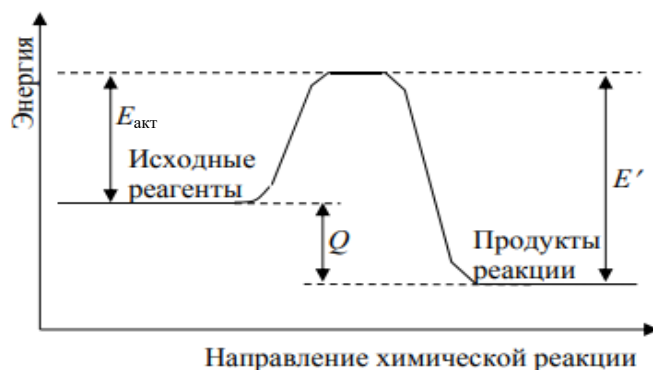
$$Q_H(C_3H_8) = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) = -474 + 144 - 1082 + 4131 = 2719 \text{ кДж/моль}$$

Несмотря на то что термодинамические расчеты тепловых эффектов учитывают только начальные и конечные результаты состояния системы и не могут быть механически скомпонованы с кинетическими схемами разветвленных цепных реакций, они позволяют учитывать вклад тепловых эффектов за счет образования H_2O и CO_2 . Анализ проведенных автором расчетов показал, что расчеты теплоты сгорания водорода с учетом энергий связи и вклада каждой из стадий протекания реакции позволяет определять стадию с наибольшим

тепловым эффектом, прерывание которой позволяет эффективнее и быстрее достигать снижения тепловыделения в зоне реакции вплоть до полного прекращения горения. На основании расчетов можно сделать вывод, что для подавления реакции горения водорода огнетушащее вещество главным образом должно обеспечивать исключение возможности протекания второй стадии окисления радикала $\cdot\text{OH}$, а для подавления реакции горения пропана – стадии окисления углерода. С учетом тепловой теории потухания можно предположить, что на основе тепловых эффектов каждой из стадий реакции горения можно подбирать требуемые огнетушащие составы.

Тепловая теория потухания пламени позволяет определить многие расчетные предельные параметры прекращения горения расчетным путем (концентрационные пределы распространения пламени, температурные пределы распространения пламени, минимальное взрывоопасное содержание кислорода, минимальная энергия зажигания и др.). Тепловая теория потухания также свидетельствует о существовании критической температуры – температуры потухания пламени, ниже которого протекание процесса горения невозможно, а достичь снижения температуры в зоне горения возможно путем снижения тепловыделения или повышения теплоотвода [9, с. 142]. При этом известно, что кинетическое и диффузионное пламя можно погасить охлаждением зоны горения всего на 100–300 К [5, с. 142]. Но данная теория не позволяет устанавливать взаимосвязь механизмов огнетушащего действия ингибирующих и флегматизирующих составов и обосновывать эффективность их применения. Механизмы действия ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов главным образом снижают тепловыделение из зоны горения за счет снижения скорости химической реакции. Ингибиторы непосредственно прерывают протекание цепной реакции горения, а флегматизаторы главным образом снижают концентрации горючих веществ. Поэтому с учетом особенностей пламенного горения на реальных пожарах можно предположить, что более эффективным будет тушение, обусловленное снижением тепловыделения в зоне горения за счет синергии механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов.

Тепловой эффект химической реакции Q рассчитывается по следствию из закона Гесса и не зависит от величины энергии активации $E_{\text{акт}}$, т.е. от того, по какому механизму происходит реакция, а зависит только от начального и конечного состояния системы (рис. 2) [10, с. 12].



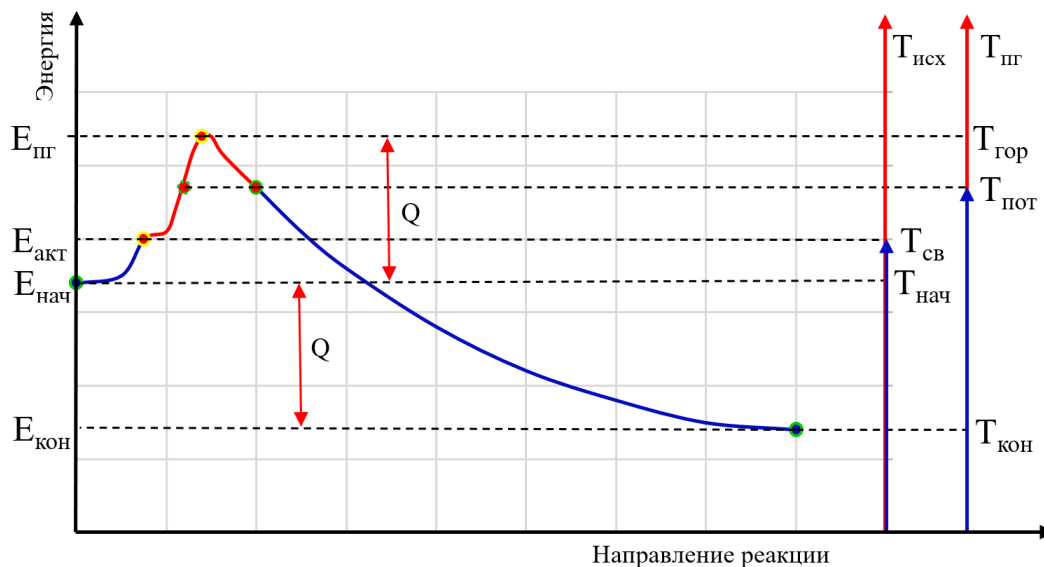
$E_{\text{акт}}$ — энергия активации; Q — тепловой эффект реакции; E' — конечное энергетическое состояние системы

Рисунок 2. — Энергетическая схема химической реакции

На основе представленной на рисунке 2 энергетической схемы рассчитывается тепловой эффект реакции горения. При этом схема отражает только начальные и конечные состояния веществ системы и не дает полного представления о промежуточных значениях энергий продуктов горения и их температуре в моменты горения и потухания пламени.

Обобщенная температурно-энергетическая схема реакции горения (рис. 3) является предложением автора и получена на основании анализа взаимосвязи энергии реакции горения и температуры продуктов реакции с учетом тепловой теории потухания [11, рис. 1].

Обобщенная температурно-энергетическая схема реакции горения отражает промежуточные значения энергии исходных реагентов и продуктов реакции горения и устанавливает взаимосвязь их энергии с температурой.



$E_{\text{нач}}$ – начальная энергия исходных реагентов; $E_{\text{акт}}$ – энергия активации исходных реагентов;
 $E_{\text{пл}}$ – максимальная энергия продуктов горения; $E_{\text{кон}}$ – конечная энергия продуктов горения;
 Q – тепловой эффект реакции; $T_{\text{исх}}$ – температура исходных реагентов; $T_{\text{пл}}$ – температура продуктов горения;
 $T_{\text{нач}}$ – начальная температура исходных реагентов; $T_{\text{св}}$ – температура самовоспламенения исходных реагентов;
 $T_{\text{гор}}$ – максимальная температура горения; $T_{\text{пот}}$ – температура потухания; $T_{\text{кон}}$ – конечная температура горения

Рисунок 3. – Обобщенная температурно-энергетическая схема реакции горения

Представленная обобщенная температурно-энергетическая схема позволяет устанавливать взаимосвязь энергии системы с температурой системы, а для реакции горения – тепловыделения с температурой продуктов реакции (рис. 3). Температура горения ($T_{\text{гор}}$) – максимальная температура продуктов реакции, с учетом того что начальная температура исходных реагентов ($T_{\text{нач}}$) равна конечной температуре продуктов реакции горения ($T_{\text{кон}}$).

Таким образом, на основе этой взаимосвязи в соответствии с тепловой теорией потухания возможно теоретически учитывать и обосновывать влияние огнетушащих составов, в том числе появление генераций гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих составов, на достижение предельных параметров тушения пожаров. Обобщенная температурно-энергетическая схема реакции горения позволяет предположить, что температура потухания ($T_{\text{пот}}$), по сути, и есть температура самовоспламенения ($T_{\text{св}}$) горючих паров и газов в присутствии огнетушащих веществ. Из этого предположения следует, что применение огнетушащих составов, в том числе одновременно ингибирующих и флегматизирующих, препятствует протеканию цепной реакции горения и обеспечивает тушение пожара при температурах выше температуры самовоспламенения. Предположение согласуется с тепловой теорией потухания пламени и позволяет устанавливать взаимосвязь энергии с предельными параметрами прерывания горения.

Заключение

На основе проведенного анализа механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих составов, а также тепловой теории потухания и предложенной полной температурно-энергетической схемы реакции горения показана взаимосвязь энергии реакции горения с температурой горения и температурой потухания. Также предлагается требуемую интенсивность подачи огнетушащих составов рассчитывать посредством значений критической скорости химической реакции. Можно сделать вывод, что неизученным является вопрос о влиянии химического и массового состава, концентрации и дисперсности генераций

ингибирующих и флегматизирующих составов на достижение предельных параметров тушения пожаров, в том числе при их одновременном применении. Таким образом, для изучения вышеуказанного вопроса требуется проведение экспериментальных исследований, которые позволят установить зависимости достижения предельных параметров прекращения горения от интенсивности подачи ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл; пер. с англ. К.Г. Боштейна; под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
2. Суббочева, М.Ю. Теория химико-технологических процессов органического синтеза: учеб. пособие / М.Ю. Суббочева, К.В. Брянкин, А.А. Дегтярев. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2012. – 161 с.
3. Общая органическая химия: в 12 т. / под общ. ред. Д. Бартона, У.Д. Оллиса. – М.: Химия, 1981. – Т. 1: Стереохимия, углеводороды, галогенсодержащие соединения / под ред. Дж.Ф. Стоддарта. – Пер. с англ.; под ред. Н.К. Кочеткова. – 736 с.
4. Семенов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
5. Ганкин, В.Ю. Новая общая теория химической связи, кинетики и катализа / В.Ю. Ганкин, Ю.В. Ганкин. – Л.: Химия, 1991. – 80 с. – ISBN 5-7245-0799-X.
6. Лебедев, Н.М. Теория технологических процессов органического и нефтехимического синтеза / Н.Н. Лебедев, М.Н. Манаков, В.Ф. Швец. – М.: Химия, 1975. – 478 с.
7. Образцова, Е.Ю. Основы физической химии: учеб. пособие / Е.Ю. Образцова, А.В. Рухов. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2023. – 81 с. – 1 CD-ROM. – ISBN 978-5-8265-2718-4.
8. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск: Современная школа, 2005. – С. 68–80. – ISBN 985-6751-04-7.
9. Сечин, А.И. Теория горения и взрыва: учеб. пособие / А.И. Сечин, В.А. Перминов, О.Б. Назаренко [и др.]; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 162 с.
10. Андросов, А.С. Теория горения и взрыва: учеб. пособие / А.С. Андросов, И.Р. Бегишев, Е.П. Салеев. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 209 с.
11. Журов, М.М. Особенности механизмов действия ингибирующих и флегматизирующих огнетушащих составов / М.М. Журов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т. 7, № 3. – С. 282–294. – DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-3.282. – EDN: FOVSVC.

**О роли генераций гетерофазных ингибирующих и флегматизирующих составов
для тушения пожаров**

**On the role of generations of heterophase inhibiting and phlegmatizing compositions
for fire extinguishing**

Журов Марк Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра химической,
биологической, радиационной и ядерной
защиты, начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: Zhurmark@mail.ru

SPIN-код: 8325-4796

Mark M. Zhurov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological,
Radiation and Nuclear Protection,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: Zhurmark@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5228-7371

ON THE ROLE OF GENERATIONS OF HETEROPHASE INHIBITING AND PHLEGMATIZING COMPOSITIONS FOR FIRE EXTINGUISHING

Zhurov M.M.

Purpose. To study the peculiarities and conditions of appearance of heterophase inhibiting and phlegmatizing compositions generation during fire extinguishing, and to establish the relationship of combustion reaction energy with combustion temperature and dying out temperature.

Methods. Analysis, comparative evaluation of mechanisms of action of inhibiting and phlegmatizing compositions.

Findings. On the basis of the analysis of mechanisms of action of inhibiting and phlegmatizing compositions it is established that the role of generation of heterophase inhibiting and phlegmatizing compositions in fire extinguishing is not studied taking into account the thermal theory of extinguishing and the complete temperature-energy scheme of combustion reaction. Interrelation of combustion reaction energy with combustion temperature and extinguishing temperature is shown. It is proposed to calculate the required intensity of fire extinguishing compositions supply by means of the values of the critical rate of chemical reaction. In case of application of simultaneously inhibiting and phlegmatizing compositions it is proposed to take into account the influence of appearance of their generations on reaching the limiting parameters of fire extinguishing.

Application field of research. Modern approaches to the development of target fire extinguishing compositions. Development of innovative fire extinguishing compositions.

Keywords: thermal theory of dying out, inhibiting and phlegmatizing compositions, fire extinguishing, bonding energy, radicals, radical-chain mechanism.

(The date of submitting: July 24, 2024)

REFERENCES

1. Drayzdeyl D. *Vvedenie v dinamiku pozharov* [Introduction to fire dynamics]; translation from English. Moscow: Stroyizdat, 1990. 424 p. (rus)
2. Subbocheva M.Yu., Bryankin K.V., Degtyarev A.A. *Teoriya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov organicheskogo sinteza: uchebnoe posobie* [Theory of chemical and technological processes of organic synthesis]; tutorial. Tambov: Tambov State Technical University, 2012. 161 p. (rus)
3. *Comprehensive organic chemistry. The synthesis and reactions of organic compounds: in 12 volumes. Vol. 1. Stereochemistry, hydrocarbons, halo compounds.* Ed. by J.F. Stoddart; translation from English. Moscow: Khimiya, 1981. 736 p. (rus)
4. Semenov N.N. *Tsepnye reaktsii* [Chain reactions]. Moscow: Nauka, 1986. 535 p. (rus)
5. Gankin V.Yu., Gankin Yu. V. *Novaya obshchaya teoriya khimicheskoy svyazi, kinetiki i kataliza* [New general theory of chemical bonding, kinetics and catalysis]. Leningrad: Khimiya, 1991. 80 p. (rus). ISBN 5-7245-0799-X.
6. Lebedev N.M., Manakov M.N., Shvets V.F. *Teoriya tekhnologicheskikh protsessov organicheskogo i neftekhimicheskogo sinteza* [Theory of technological processes of organic and petrochemical synthesis]. Moscow: Khimiya, 1975. 478 p. (rus)
7. Obratsova E.Yu., Rukhov A.V. *Osnovy fizicheskoy khimii* [Fundamentals of physical chemistry]; tutorial. Tambov: Tambov State Technical University, 2023. 81 c. 1 CD-ROM. (rus). ISBN 978-5-8265-2718-4.
8. Volkov A.I., Zharskiy I.M. *Bol'shoy khimicheskiy spravochnik* [Large chemical handbook]. Minsk: Sovremennaya shkola, 2005. Pp. 68–80. (rus). ISBN 985-6751-04-7.
9. Sechin A.I., Perminov V.A., Nazarenko O.B., Amel'kovich Yu.A., Sechin A.A., Zadorozhnaya T.A. *Teoriya goreniya i vzryva* [Theory of combustion and explosion]; tutorial. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2020. 162 p. (rus)
10. Androsov A.S., Begishev I.R., Saleev E.P. *Teoriya goreniya i vzryva* [Theory of combustion and explosion]; tutorial. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2007. 209 p. (rus)
11. Zhurov M.M. Osobennosti mekhanizmov deystviya ingibiruyushchikh iflegmatiziruyushchikh ognetushashchikh sostavov [Features of the mechanisms of action of inhibiting and phlegmatizing fire extinguishing compositions]. *Journal of Civil Protection*, 2023. Vol. 7, No. 3. Pp. 282–294. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-3.282. EDN: FOVSVC.

Copyright © 2024 Zhurov M.M.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Кудряшов В.А., Дробыш А.С.

Цель. Провести анализ имеющихся экспериментальных и теоретических исследований по определению пожароопасных свойств полимерных композитных материалов и конструкций, а также возможности их применения в строительстве.

Методы. Обзор, анализ и сравнение существующих результатов экспериментальных и теоретических исследований по исследуемой тематике.

Результаты. Проведен обзор и выявлены основные проблемы применения полимерных композитных (стеклопластиковых) материалов и конструкций при проектировании и строительстве зданий и сооружений. Рассмотрены результаты отечественных и зарубежных экспериментальных и теоретических исследований. Определена область применения полимерных композитных (стеклопластиковых) материалов и конструкций с учетом требований пожарной безопасности нормативных документов в области строительства.

Область применения исследований. Проектирование и строительство зданий и сооружений с использованием полимерных композитных (стеклопластиковых) материалов и конструкций.

Ключевые слова: композитные материалы, стеклопластик, горючесть, огнестойкость, огнезащита, экспериментальные исследования, пожарная опасность, критическая температура.

(Поступила в редакцию 14 октября 2024 г.)

Введение

Полимерные композитные материалы получили широкое применение в различных отраслях и направлениях, таких как автомобиле-, ракетно-, авиационное, морская техника [1–5]. Не составляет исключения строительная отрасль¹ [6; 7]. Независимо от области применения материалы и конструкции должны соответствовать установленным требованиям нормативных документов в области пожарной безопасности. Требования пожарной безопасности во всем мире базируются на классификации материалов и конструкций в области пожарной опасности/безопасности и проведения соответствующих испытаний [8, с. 233–486]. При этом именно в строительной области такие требования оказались наиболее серьезными.

Требования нормативных документов Республики Беларусь в области пожарной безопасности строительства также имеют строгую классификацию, определяющую область их применения.

Согласно разделу 5 «Пожарно-техническая классификация» СН 2.02.05-2020² «Пожарная безопасность зданий и сооружений» для строительных материалов определены следующие показатели пожарной опасности: Г – горючесть, В – воспламеняемость, РП – распространение пламени по поверхности, Д – дымообразующая способность и Т – токсичность продуктов горения. Однако в большинстве случаев эти показатели используют для отделочных материалов. Применение полимерных композитных (стеклопластиковых) материалов в качестве отделочных не исключено, однако в настоящей статье они рассмотрены исключительно в качестве самостоятельных строительных конструкций.

¹ Design of fibre-polymer composite structures: PD CEN/TS 19101:2022; effect. 28.04.2023. – 242 p. – ISBN: 978-0-539-13572-5.

² Пожарная безопасность зданий и сооружений. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 2.02.05-2020. – Взамен СН 2.02.01-2019, ТКП 45-2.02-315-2018 (33020). – Введ. 04.04.2021. – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 70 с.

Строительные конструкции, согласно³ классифицируют по пределу огнестойкости и классу пожарной опасности.

Предел огнестойкости конструкции⁴ – промежуток времени от начала огневого воздействия в условиях стандартных испытаний до наступления одного из нормируемых для данной конструкции предельных состояний: потеря несущей способности R , потеря целостности E , потеря теплоизолирующей способности I , предельная величина плотности теплового потока W . В целом предельные состояния по огнестойкости можно разделить на два основных направления: обеспечение несущей способности конструкции при пожаре и обеспечение огнепреграждающей способности⁵. Эффективные композитные стеклопластиковые конструкции применяют преимущественно в качестве стержневых элементов, соответственно, для них огнепреграждающая способность мало применима, в то время как предельное состояние по несущей способности R является основным показателем несущей способности таких конструкций при пожаре.

И если несущая способность при пожаре обеспечивает конструктивную безопасность зданий и сооружений, в том числе защиту от прогрессирующего обрушения, «класс пожарной опасности» – это характеристика, отвечающая за способность (неспособность) конструктивных элементов распространять пламя по своей поверхности за пределами локальной зоны горения. Для этого в классификации используют целночисленные индексы $K0...K3$, которые говорят о том, что конструкция в условиях специальных испытаний либо не способна к распространению пламени ($K0$), либо способна в крайней степени ($K3$), либо ограниченно способна ($K1, K2$)⁶.

При установлении класса пожарной опасности дополнительно учитываются характеристики пожарной опасности поврежденных в ходе испытаний материалов: горючесть, воспламеняемость и дымообразующая способность. Использование такого подхода, очевидно, позволяет более строго ограничивать вероятное распространение пламени по поверхности, понимая, что в реальных условиях мощность/площадь локальной зоны горения может быть масштабно более высокой; в том числе более широко задействовать систему мелкомасштабных испытаний. Поэтому для конструкций, способных повреждаться в условиях огневого воздействия [9, с. 90–106] мелкомасштабные испытания пожарной опасности также становятся обязательными.

Отметим, что оценка предела огнестойкости⁷ и класса пожарной опасности⁸ строительных конструкций осуществляется согласно ГОСТ 30247.0-94⁹. По результатам испытаний материала, проведенным по методикам ГОСТ 30247.0-94, определяется его способность сопротивляться повреждению в диапазоне температур стандартного пожара (в пределах времени до 120 мин, реже – выше) и в конечном счете область применения в строительстве.

³ См. сноску 2.

⁴ Система стандартов пожарной безопасности. Пассивная противопожарная защита. Термины и определения: СТБ 11.0.03-95. – Введ. 16.10.1995 // Официальная информационно-поисковая система «Стандарт». – URL: <https://ips3.belgiss.by/TnpaDetail.php?UrlId=19386> (дата обращения: 02.10.2024).

⁵ См. сноску 4.

⁶ Конструкции строительные. Методы определения пожарной опасности: СТБ 1961-2009. – Введ. 20.05.2009 // Официальная информационно-поисковая система «Стандарт». – URL: <https://ips3.belgiss.by/TnpaDetail.php?UrlId=326630> (дата обращения: 02.10.2024).

⁷ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Введ. 01.01.1996 // Официальная информационно-поисковая система «Стандарт». – URL: <https://ips3.belgiss.by/TnpaDetail.php?UrlId=18320> (дата обращения: 15.02.2024).

⁸ См. сноску 4.

⁹ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.01.1996 // Официальная информационно-поисковая система «Стандарт». – URL: <https://ips3.belgiss.by/TnpaDetail.php?UrlId=18319> (дата обращения: 15.02.2024).

Поэтому исследование механических и теплофизических свойств материала при высокотемпературном тепловом воздействии является важной научной задачей, что в сочетании с характеристиками пожарной опасности/безопасности позволит четко определять область применения материалов в строительстве.

Стоит отметить, что в некоторых работах [10; 11] была установлена искомая взаимосвязь между теорией горения, механикой полимеров и их огнестойкостью. В работе [12] отмечено, что лабораторные исследования горючести полимерных композитных материалов могут стать важным аспектом в части прогнозирования предела огнестойкости конструкций, в том числе в условиях реального пожара.

Настоящая статья посвящена анализу взаимосвязи механических, теплофизических свойств полимерных композитных стеклопластиковых конструкций в сочетании с характеристиками их горючести и показателями огнестойкости.

Обзор существующих исследований и полученных результатов

Существует различное множество рецептов и способов изготовления полимерных композитных материалов, исходя из предъявляемых требований к готовому изделию или материалу [13, с. 297–343; 14]. В зависимости от показателей пожарной опасности/безопасности рецептуры могут значительно отличаться, что зачастую требует большого спектра испытаний даже для отдельно взятой рецептуры. Однако понимание общих закономерностей горения полимеров позволяет упростить эту задачу.

Впервые проблема горения полимеров привлекла внимание ученых еще в XIX в., в связи с открытием огнеопасной целлюлозы и целлулоида [15]. И в настоящее время проблеме горения полимерных материалов и реализации комплексного подхода к ее изучению посвящено множество научных исследований в данной области. Ее решение связано не только с вопросами химии полимеров, химической кинетики (цепные реакции, термическая и термоокислительная деструкция, горение, взрыв), органической химии (синтез и свойства добавок, снижающих горючесть), но и с проблемами математической физики (пограничный слой с химическими реакциями) и в некоторых случаях со сложной техникой эксперимента [6; 16–19; 20, с. 47–74].

Особое внимание стоит уделить и вопросу механизма разрушения композитного полимерного материала в условиях повышенных температур. При нормальных условиях механизм разрушения материала зависит от множества параметров: свойств волокон и матрицы, схемы укладки слоев, особенностей отверждения, температуры и т.д. [8, с. 83–86; 21]. Многочисленные исследования в области изучения свойств полимерных материалов и композитов, а также характер их изменения при воздействии температур свидетельствуют о том, что поведение полимерных композитных материалов может быть либо термопластичным, либо термореактивным [22, с. 25].

Термопластичные полимеры (термопласты) обладают свойством многократно переходить при нагревании в состояние расплава – при повышенных температурах они находятся в пластическом, вязкотекучем состоянии. Схожее поведение характерно и для металлов, у которых в качестве критерия огнестойкости часто используют понятие «критическая температура», соответствующая потере прочности или несущей способности в условиях максимально возможных напряжений [23, с. 91–92].

Термореактивные полимеры (реактопласты) при нагревании выше определенных температур становятся неплавкими – обугливаются. Как известно, обугливание при воздействии высоких температур наиболее характерно для древесины, где предел огнестойкости наступает вследствие уменьшения размеров сечения [23, с. 94–95; 24].

Обзор литературных источников показал, что полномасштабные экспериментальные исследования по определению предела огнестойкости композитных стеклопластиковых строительных конструкций ранее не проводились. Однако имеются результаты отдельных экспериментальных и аналитических исследований огнестойкости.

Например, интерес вызывают сопоставительные результаты испытаний сплошной бетонной плиты со стальной либо композитной арматурой, защитный слой которой составлял 25 мм [25]. В результате испытаний установлено, что предел огнестойкости по несущей способности (R) исследуемой бетонной плиты со стальной арматурой наступил на 88-й минуте после начала стандартного огневого воздействия, в то время как предел огнестойкости аналогичной плиты с композитной арматурой оказался не более 5 мин, сопровождался быстрым нарастанием скорости прогиба и последующим обрушением конструкции. На 3–4-й минуте испытания в плите образовались широкие поперечные трещины, по сути, свидетельствующие об образовании линейного пластического шарнира, способствующие переносу теплоты непосредственно на растянутые композитные стержни и скорейшему разрушению. Указанные результаты свидетельствуют, что температура размягчения стеклопластиковой арматуры значительно ниже стальной, и стандартные защитные слои не могут обеспечить огнестойкость указанной конструкции до стандартных значений. Подобные результаты опубликованы и в работах [26–28]. В работе [28] было предложено ограничивать нагрев стеклопластиковой арматуры в бетонных сечениях до 150 °С. В частности, увеличение защитного слоя бетона до 60 мм и использование огнезащитных красок и составов при средней толщине огнезащитного покрытия 5 мм позволяют достичь указанного ограничения нагрева в течение 90 мин стандартного огневого воздействия.

Таким образом, для повышения огнестойкости полимерных материалов могут использоваться химическую/технологическую модификацию полимеров: применение антипиренов и (или) негорючих наполнителей, нанесение огнезащитных покрытий, использование огнезащитных плит [17; 23, с. 74–76, 81; 29, с. 34–50; 30].

Результаты экспериментальных исследований эффективности огнезащитного вспучивающегося покрытия на основе перхлорвинилового смолы для композитного полимерного материала на примере стеклопластика методом воздействия открытого огня на обработанный образец опубликованы в работе [31]. Авторы провели экспериментальные исследования эффективности вспучивающегося покрытия с целью установления времени достижения предельного состояния стеклопластика (в данном случае было принято достижение значения температуры начала деструкции 280...300 °С) под действием пламени горелки на образец (максимальное значение температуры пламени достигало 840 °С). Значения температур на необогреваемой поверхности опытного образца стеклопластика с течением времени до момента достижения образцом предельного состояния регистрировались с помощью пирометра. Стоит отметить, что достижение значения температуры на необогреваемой поверхности образца в диапазоне 100–150 °С от времени начала огневого воздействия были получены за относительно короткий интервал времени, не превышающий 60 с, что свидетельствует о низкой эффективности огнезащитного покрытия и неприменимости его в качестве огнезащиты для стеклопластика.

В работе [32] авторы изначально акцентируют внимание на низкой теплостойкости композиционных полимерных материалов и, соответственно, делают вывод о низком пределе огнестойкости конструкций, выполненных из этих материалов, исходя из ранее проведенных ими исследований. Авторами отмечено, что при достижении значений температуры в диапазоне 80–150 °С происходит существенное снижение прочности полимерного композитного материала. Это свидетельствует о том, что самостоятельно без дополнительной огнезащиты материал не сможет выдержать теплового воздействия при пожаре. В результате проведенных расчетов температурных полей в полимерной конструкции авторами было установлено, что использование огнезащиты в виде плит, матов и штукатурок замедляет скорость прогрева конструкции, не достигая критических значений температуры, что, в свою очередь, позволяет обеспечить огнестойкость конструкции и достижение требуемого предела ее огнестойкости. Как свидетельствуют авторы, огнезащита в виде вспучивающегося покрытия также применима для повышения огнестойкости композиционных полимерных материалов и конструкций из них, но необходимо обратить особое внимание на значение

температуры начала вспучивания и его адгезию к применяемому материалу¹⁰. Используя зависимости значений температур от толщины огнезащитного слоя и вида огнезащиты, полученные с помощью математического моделирования, авторы спрогнозировали предел огнестойкости конструкции, однако экспериментальных исследований огнестойкости авторы не проводили.

Информация о проведении экспериментальных исследований класса пожарной опасности композитных полимерных строительных конструкций отсутствует¹¹. Имеются результаты огневых испытаний по определению класса пожарной опасности для клеенодеревянных панелей с огнезащитой, которые приведены в работе [33]. Автором были проведены экспериментальные исследования по определению показателей пожарной опасности для клеенодеревянной панели (Г, В, Д, Т), а также по определению класса пожарной опасности для конструкции из клеенодеревянных панелей. Получены результаты, которые свидетельствуют о том, что применение огнезащиты позволяет достичь показателей пожарной опасности Г 1, В 1, Д 2 (без огнезащиты Г 4, В 2, Д 3) для клеенодеревянной панели, а также получить класс пожарной опасности К0 для конструкции из клеенодеревянных панелей в течение 30 мин огневого воздействия по стандартному температурному режиму.

Анализ литературных источников свидетельствует, что применение в строительстве материалов, а также конструкций, выполненных из них, является весьма актуальной задачей и перспективным научным направлением. Однако требования действующего законодательства в области строительства и пожарной безопасности значительно сужают их сферу возможного применения в качестве конструкций в зданиях и сооружениях с нормируемой степенью огнестойкости, т.к. требуемый минимальный предел огнестойкости не был достигнут для композитной полимерной конструкции ни в одних проводимых исследованиях. Необходима разработка алгоритма исследований, а также комплексной оценки показателей пожарной опасности для материалов и конструкций, включая моделирование теплового воздействия, которое позволит более детально спрогнозировать поведение конструкции и получить необходимые показатели пожарной опасности в соответствии с требованиями действующего законодательства.

Собственные исследования

Ранее авторами была разработана оригинальная методика проведения испытаний (рис. 1) для оценки горючести, теплостойкости, прочности как при нормальных условиях, так и в условиях повышенных температур, огнезащитной эффективности и предела огнестойкости композиционного полимерного материала, выполненного из стеклопластика на основе изофталевой смолы [34].



Рисунок 1. – Этапы экспериментальных исследований

¹⁰ Согласно опубликованным источникам информация о таких покрытиях отсутствует.

¹¹ Изначально проводятся испытания на определение предела огнестойкости конструкции, в случае подтверждения заявленных требований проводятся испытания на определение класса пожарной опасности.

На первом этапе экспериментальных исследований материала на горючесть и теплоустойчивость было установлено, что исследуемый материал при тепловом воздействии подвергается пиролизу и он не плавится, а обугливается. Поэтому поведение материала при пожаре будет приближенным к поведению древесины, однако стоит учитывать тот факт, что ввиду высокой прочности его сечения при достаточно тонкой толщине (10 мм) поведение материала при пожаре может быть схожим с поведением металла (как правило, достижением критической температуры). Минимальный критический тепловой поток, при котором происходило воспламенение образца составил 20 кВт/м^2 , также было установлено, что при достижении значения температур на поверхности образца в 300°C происходило воспламенение. Было отмечено, что при достижении значений температуры порядка 150°C было зафиксировано расслаивание материала, которое сопровождалось растрескиванием с характерным звуком. Причиной растрескивания служила разность деформаций расширения нагретых слоев материала в середине образца и не нагретых по его периметру. Ввиду того что при реальных пожарах равномерный нагрев конструкций маловероятен, указанная температура была принята в качестве критерия огнестойкости, т.к. расслоение материала ведет к быстрой потере его прочностных характеристик. При этом было установлено, что температура, при которой начинаются самоускоряющиеся процессы пиролиза полимера, составляет не менее 200°C . Таким образом, значение температуры 150°C было принято в качестве критического, при котором обеспечивается необходимый запас до начала термического разложения материала. Значение критической температуры и обоснование его выбора во многом совпадает с ранее опубликованными по схожей тематике результатами исследований [8, с. 99–111; 30–32; 35].

Второй этап экспериментальных исследований был направлен на определение прочностных и деформативных свойств материала как при нормальных условиях, так и при условиях теплового воздействия. Было установлено, что при растяжении и сжатии происходит хрупкое разрушение материала. Во время теплового воздействия характер разрушения был таким же, как и при нормальных условиях, и разрушение оставалось хрупким, но напряжения практически в 2 раза уменьшились при температуре 150°C . Это можно объяснить тем, что уже при температуре 150°C нарушается сцепление матрицы со стекловолокном, и проскальзывание происходит при меньших напряжениях, соответственно, уменьшается прочность материала. Результаты второго этапа экспериментальных исследований схожи и хорошо коррелируют с результатами, которые были получены в работах [13, с. 71–72; 28; 30; 35; 36].

Третий этап экспериментальных исследований был посвящен оценке огнезащитной эффективности. Были проведены экспериментальные исследования вспучивающихся огнезащитных покрытий на установке по определению огнезащитной эффективности для металла и древесины [34]. В результате было установлено, что покрытия эффективны только для материалов и конструкций, которые подвергаются непосредственно огневому воздействию (происходит резкий тепловой удар). В случае менее интенсивного нагрева они оказываются неработоспособными, т.к. значение температуры начала работы огнезащитного состава равно значению критической температуры исследуемого материала, а то и превышает его, что в очередной раз подтверждает выводы и результаты работ [19; 30; 37].

Четвертым этапом экспериментальных исследований было применение конструктивной огнезащиты на основе гипсовых вяжущих для полимерного композиционного материала согласно СТБ 11.03.02¹². По результатам экспериментальных исследований было установлено, что применение в качестве конструктивной огнезащиты гипсокартонного листа толщиной 12,5 мм позволяет в течение 17 мин стандартного огневого воздействия пожара достичь значения температуры на поверхности образца не более 100°C , а при использовании огнестойкой армированной плиты толщиной 25 мм не более 110°C , полученные значения

¹² Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02-2010. – Введ. 20.10.2010. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2010. – 40 с.

схожи с результатами, которые были получены в работе [38]. Результаты экспериментальных исследований каждого этапа позволили впервые провести полномасштабные исследования по определению предела огнестойкости полимерной композиционной конструкции [39]. В качестве объекта полномасштабных испытаний на определение предела огнестойкости по несущей способности был принят профиль двутавровый 200×100×10 мм, балочный, полимерный композитный, изготовленный методом пултрузии с использованием изофталевой смолы, непрерывно армированной стекловолокном, соответствующий EN13706-2:2002E¹³. Профиль был шарнирно закреплен в замкнутой прямоугольной металлической раме, выполненной из швеллера. Конструктивная огнезащита крепилась к профилю методом навески с использованием прямых подвесов. Нагрузка на образец представляла собой две плиты железобетонные многопустотные массой по 1560 кг. Собственная масса балки составляла 22 кг, а масса конструктивной огнезащиты – 25 кг [39]. В результате натурных экспериментальных исследований на огнестойкость по ГОСТ 30247.1¹⁴ образец композитной конструкции на основе двутаврового профиля с использованием конструктивной огнезащиты соответствует показателю по несущей способности R30 и классу пожарной опасности K0. Исходя из полученных результатов впервые появилась возможность применения в качестве несущего элемента в зданиях и сооружениях с нормируемой степенью огнестойкости полимерного композитного двутаврового балочного профиля.

Заключение

1. Применение в строительстве полимерных композиционных конструкций возможно, однако оно ограничено требованиями по пределу огнестойкости, классу пожарной опасности с допускаемыми характеристиками пожарной опасности поврежденного материала по горючести, воспламенению и дымообразующей способности. Появление и внедрение таких конструкций при проектировании и строительстве ведет к необходимости более детально изучать свойства и поведение полимерных композиционных конструкций при тепловом воздействии с использованием как стандартных методик проведения испытаний, так и методик с изменениями и дополнениями исходя из специфики и свойств исследуемого материала.

2. Проведенный обзор литературных источников по тематике исследования свидетельствует о том, что полномасштабные экспериментальные исследования полимерных композиционных конструкций проводятся крайне редко и в значительной степени не получают желаемого результата.

3. Разработанная оригинальная методика [34] позволила спрогнозировать и более детально оценить исследуемые показатели горючести, воспламеняемости, теплостойкости, а также установить температурные и прочностные зависимости для испытываемого материала, определить предел огнестойкости по несущей способности и класс пожарной опасности конструкции. Полученные результаты исследований по несущей способности R30 [36; 39] позволили впервые использовать полимерный композитный двутавровый балочный профиль в качестве несущего элемента в зданиях и сооружениях с нормируемой степенью огнестойкости и значительно расширили его область применения при проектировании и строительстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khan, F. Advances of composite materials in automobile applications – A review / F. Khan, N. Hossain, J.J. Mim [et al.] // Journal of Engineering Research. – 2024. – DOI: 10.1016/j.jer.2024.02.017.
2. Зеленский, Э.С. Армированные пластики – современные конструкционные материалы / Э.С. Зеленский А.М. Куперман, Ю.А. Горбаткина [и др.] // Российский химический журнал. – 2001. –

¹³ Reinforced plastics composites – Specifications for pultruded profiles – Part 2: Methods of test and general requirements: EN 13706-2:2002. – Effect. 01.05.2003. – 40 p.

¹⁴ См. сноску 7.

- Т. 45, № 2. – С. 56–74. – URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2001-2/56.pdf> (дата обращения: 02.10.2024).
3. Баданина, Ю.В. Композиционные материалы в ракетно-космической технике: учеб. пособие / Ю.В. Баданина, В.Д. Баскаков, А.Л. Галиновский [и др.]; под ред. Г.В. Малышевой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 40 с. – ISBN: 978-5-7038-5136-4. – EDN: MMVBAE.
 4. Васильев, В.В. Композитные материалы в аэрокосмической технике / В.В. Васильев // Все материалы. Энциклопедический справочник – 2012. – № 7. – С. 2–7. – EDN: PAZTKP.
 5. Барботько, С.Л. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов для внешнего контура авиационной техники / С.Л. Барботько, Е.Н. Шуркова, О.С. Вольный, Н.С. Скрылев // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 1 (26). – С. 56–59. – EDN: PUOYAV.
 6. Sun, S. New progress in the application of flame-retardant modified epoxy resins and fire-retardant coatings / S. Sun, Q. Yu, B. Yu, F. Zhou // Coatings. – 2023. – Vol. 13, Iss. 10. – Article 1663. – 23 p. – DOI: 10.3390/coatings13101663.
 7. Бондарь, К.Я. Полимерные строительные материалы: справ. пособие / К.Я. Бондарь, В.Л. Ершов, М.Г. Соломенко. – М.: Стройиздат, 1974. – 268 с.
 8. Troitzsch, J. Plastics flammability handbook: Principles, regulations, testing, and approval / J. Troitzsch. – Munich: Hanser Gardner Publications, 2004. – 748 p.
 9. Васильев, А.А. Дефекты и повреждения строительных конструкций: учеб. пособие / А.А. Васильев. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 361 с. – EDN: SKDNBB.
 10. Баренблатт, Г.И. Горение и взрыв / Г.И. Баренблатт // Горение и взрыв: материалы Третьего Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву, 5–10 июля 1971 г. / Акад. наук СССР, М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, М-во хим. пром-сти СССР; отв. ред. Л.Н. Стесик. – М.: Наука, 1972. – С. 15–23.
 11. Михайлин, Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 416 с.
 12. Константинова, Н.И. К вопросу об оценке эффективности огнезащитных полимерных материалов / Н.И. Константинова, Н.В. Смирнов, А.Ю. Шебеко // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 7–8. – С. 32–42. – DOI: 10.18322/pvb.2018.27.7-8.32-42. – EDN: XYXVHN.
 13. Баженов, С.Л. Полимерные композиционные материалы: монография / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 352 с. – ISBN 978-5-91559-045-7.
 14. Ушков, В.А. Воспламеняемость и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов / В.А. Ушков // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 8 (107). – С. 897–903. – EDN: ZFBXXR.
 15. Ломакин, С.М. Замедлители горения для полимеров / С.М. Ломакин, Г.Е. Заиков, А.К. Микитаев, [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 7. – С. 71–86. – EDN: LXNTRB.
 16. Ушков, В.А. Разработка научных основ получения полимерных строительных материалов с пониженной пожарной опасностью: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / Ушков Валентин Анатольевич; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва, 2020. – 46 с.
 17. Жирикова, З.М. Огнестойкость полимерных материалов и способы ее повышения / З.М. Жирикова, В.З. Алоев, М.А. Тарчокова // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2019. – № 3 (25). – С. 43–48. – EDN: MYEGQE.
 18. Власенко, Ф.С. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях / Ф.С. Власенко, А.Е. Раскутин // Труды ВИАМ. – 2013. – № 8. – Статья 3. – EDN: RAEFMB.
 19. Гаращенко, А.Н. Обеспечение требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композиционных материалов с помощью огнезащиты / А.Н. Гаращенко, В.П. Рудзинский, В.О. Каледин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 8 (145). – С. 143–149. – EDN: RAJJBN.
 20. Кодолов, В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов / В.И. Кодолов. – М.: Химия, 1976. – 160 с.
 21. Дудченко, А.А. Анизотропные многослойные пластины и оболочки / А.А. Дудченко, С.А. Лурье, И.Ф. Образцов // Итоги науки и техники. Серия: Механика деформируемого твердого тела. – М.: ВИНТИ, 1983. – Т. 15. – С. 3–68.
 22. Петрюк, И.П. Материаловедение. Полимерные материалы и композиты: учеб. пособие: в 2 ч. / И.П. Петрюк. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – Ч. 1. – 68 с. – ISBN 978-5-9948-0852-8.

23. Романенков, И.Г. Огнезащита строительных конструкций / И.Г. Романенков, Ф.А. Левитес. – М.: Стройиздат, 1991. – 320 с.
24. Albert, C.M. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites: A 10-year review from 2012 to 2021 / C.M. Albert, K.C. Liew // *Journal of Bioresources and Bioproducts*. – 2024. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 27–42. – DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004.
25. Голованов, В.И. Экспериментальные и аналитические исследования огнестойкости сплошной бетонной плиты со стальной и композитной арматурой / В.И. Голованов, В.В. Павлов, А.В. Пехотиков // *Пожарная безопасность*. – 2013. – № 2. – С. 44–51. – EDN: QZBNQX.
26. Ширко, А.В. Определение механических свойств композитной арматуры с учетом температурного воздействия / А.В. Ширко, А.Н. Камлюк, А.В. Спиглазов, А.С. Дробыш // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2015. № 2 (31). – С. 59–65. – EDN: TWAIDN.
27. Камлюк, А.Н. Влияние теплового воздействия пожара на механические свойства композитной арматуры / А.Н. Камлюк, А.В. Ширко, А.В. Спиглазов, А.С. Дробыш // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2015. – № 2 (22). – С. 4–11. – EDN: UHNCAD.
28. Борисова, Т.А. Исследование влияния температурного воздействия на работу стеклопластиковой арматуры в бетонных конструкциях / Т.А. Борисова, Т.А. Зиннуров, А.Н. Куклин // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2018. – № 2 (44). – С. 136–144. – EDN: XQCNJJ.
29. Асеева, Р.М. Снижение горючести полимерных материалов / Р.М. Асеева, Г.Е. Заиков. – М.: Знание, 1981. – 64 с.
30. Гаращенко, А.Н. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) / А.Н. Гаращенко, А.А. Берлин, А.А. Кульков // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2019. – Т. 28, № 2. – С. 9–30. – DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30. – EDN: FLHRNA.
31. Каблов, В.Ф. Исследование эффективности огнетеплозащитного вспучивающегося покрытия на основе перхлорвиниловой смолы для стеклопластика / В.Ф. Каблов, Н.А. Кейбал, С.Н. Бондаренко [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – Т. 16, № 13. – С. 119–122. – EDN: QLQCEZ.
32. Гаращенко, А.Н. Огнезащита конструкций из полимерных композитов и оценка ее эффективности / А.Н. Гаращенко, А.В. Суханов, Н.А. Гаращенко [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2009. – Т. 18, № 5. – С. 15–24. – EDN: KTYGMD.
33. Гаращенко, Н.А. Огнезащита конструкций из полимерных композитов и оценка ее эффективности / Н.А. Гаращенко // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2006. – Т. 15, № 2. – С. 12–16. – EDN: HUIZXV.
34. Кудряшов, В.А. Методика оценки огнестойкости полимерных композитных материалов и параметров необходимой огнезащиты / Ю.С. Иванов, А.Г. Яцукович, В.А. Кудряшов, А.С. Дробыш // *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. – 2015. – № 1 (37). – С. 55–65. – EDN: WDKVQH.
35. Павлов, В.В. Прочность конструкций из стеклопластиков при повышенных и высоких температурах: автореферат дис. ... доктора технических наук: 01.02.06 / Павлов Виктор Павлович; Уфимский гос. авиац. техн. ун-т (УГАТУ). – Уфа, 2005. – 32 с.
36. Кудряшов, В.А. Результаты экспериментальных исследований огнестойкости полимерных композитных материалов, армированных стекловолокном / В.А. Кудряшов, А.С. Дробыш, А.М. Соловьянчик // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2015. – № 1 (21). – С. 17–24. – EDN: ТКPYGP.
37. Корольченко, А.Я. Расчеты толщин огнезащиты, обеспечивающих требуемые показатели пожарной опасности деревоклееных конструкций / А.Я. Корольченко, А.Н. Гаращенко, Н.А. Гаращенко, В.П. Рудзинский // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2008. – Т. 17, № 3. – С. 49–56. – EDN: KNUAMJ.
38. Басакович, И.А. Огнезащитная эффективность гипсовых плит Knauf Fireboard для вертикальных стальных профилей различного сортамента / И.А. Басакович, С.С. Ботян, С.М. Жамойдик [и др.] // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 268–282. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.268. – EDN: JCWJCS.
39. Кудряшов, В.А. Экспериментальные исследования огнестойкости полимерных композитных конструкций с огнезащитой / В.А. Кудряшов, И.И. Полевода, А.С. Дробыш, А.М. Соловьянчик // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2015. – № 1 (21). – С. 25–29. – EDN: ТКPYGZ.

**Особенности применения полимерных композитных материалов
и конструкций в строительстве**

Features of application of polymer composite materials and structures in construction

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
пожарной безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск

Email: vadmud@gmail.com

SPIN-код: 1417-4096

Vadim A. Kudryashov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk

Email: vadmud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Дробыш Антон Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», отдел научной
и инновационной деятельности,
начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск

Email: aantox@mail.ru

SPIN-код: 3169-0097

Anton S. Drobyshev

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Department of Scientific and Innovation Activity,
Head of Department

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk

Email: aantox@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9528-3108

FEATURES OF APPLICATION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND STRUCTURES IN CONSTRUCTION

Kudryashov V.A., Drobysh A.S.

Purpose. To analyze the available experimental and theoretical studies to determine the fire hazard properties of polymer composite materials and structures, as well as the possibility of their application in construction.

Methods. Review, analysis and comparison of existing results of experimental and theoretical studies on the investigated subject.

Findings. The review was carried out and the main problems of application of polymer composite (fiberglass) materials and structures in the design and construction of buildings and structures were revealed. The results of domestic and foreign experimental and theoretical studies have been considered. The area of application of polymer composite (fiberglass) materials and structures with regard to fire safety requirements of normative documents in the field of construction is determined.

Application field of research. Design and construction of buildings and structures using polymer composite (fiberglass) materials and structures.

Keywords: composite materials, fiberglass, combustibility, fire resistance, fire protection, experimental studies, fire hazard, critical temperature.

(The date of submitting: October 14, 2024)

REFERENCES

1. Khan F., Hossain N., Mim J.J., Rahman SM M., Iqbal Md. J., Billah M., Chowdhury M.A. Advances of composite materials in automobile applications – A review. *Journal of Engineering Research*, 2024. DOI: 10.1016/j.jer.2024.02.017.
2. Zelenskiy E.S., Kuperman A.M., Gorbakina Yu.A., Berlin A.A., Ivanova-Mumzhieva V.G. Armirovannye plastiki – sovremennye konstruktsionnye materialy [Reinforced plastics – modern construction materials]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2002. Vol. 45, No. 2. Pp. 56–74. (rus). URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2001-2/56.pdf> (date of access: October 2, 2024). (rus)
3. Badanina Yu.V., Baskakov V.D., Galinovskiy A.L., Nelyub V.A., Zarubina O.V., Malysheva G.V. *Kompozitsionnye materialy v raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Composite materials in rocket and space techniques]: tutorial. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2019. 40 p. (rus). ISBN: 978-5-7038-5136-4. EDN: MMVBAE.
4. Vasil'ev V.V. *Kompozitnye materialy v aerokosmicheskoy tekhnike* [Composite materials in aerospace techniques]. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik*, 2012. No. 7. Pp. 2–7. (rus). EDN: PAZTKP.
5. Barbot'ko S.L., Shurkova E.N., Vol'nyy O.S., Skrylev N.S. Otsenka pozharnoy bezopasnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov dlya vneshnego kontura aviatsionnoy tekhniki [Evaluation of polymer composite fire-safety for the outer contour of aeronautical engineering]. *Aviation Materials and Technologies*, 2013. No. 1 (26). Pp. 56–59. (rus). EDN: PUOYAV.
6. Sun S., Yu Q., Yu B., Zhou F. New progress in the application of flame-retardant modified epoxy resins and fire-retardant coatings. *Coatings*, 2023. Vol. 13, Iss. 10. Article 1663. 23 p. DOI: 10.3390/coatings13101663.
7. Bondar' K.Ya., Ershov V.L., Solomenko M.G. *Polimernye stroitel'nye materialy* [Polymeric building materials]: reference manual. Moscow: Stroyizdat, 1974. 268 p. (rus)
8. Troitzsch J. *Plastics flammability handbook: Principles, regulations, testing, and approval*. Munich: Hanser Gardner Publications, 2004. 748 p.
9. Vasil'ev A.A. *Defekty i povrezhdeniya stroitel'nykh konstruktsiy* [Defects and damage of building structures]: tutorial. Gomel: Belarusian State University of Transport, 2012. 361 p. (rus). EDN: SKDNBB.
10. Barenblatt G.I. Gorenje i vzryv [Combustion and explosion]. *Proc. of the Third All-Union Symposium on Combustion and Explosion, July 5-10, 1971*. Academy of Sciences of USSR. Moscow: Nauka, 1972. Pp. 15–23. (rus)
11. Mikhaylin Yu.A. *Teplo-, termo- i ognestoykost' polimernykh materialov* [Heat, thermal and fire resistance of polymeric materials]. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2011. 416 p. (rus)

12. Konstantinova N.I., Smirnov N.V., Shebeko A.Yu. K voprosu ob otsenke effektivnosti ognezashchitnykh polimernykh materialov [Revisiting the assessment of polymeric materials fire protection efficiency] *Fire and Explosion Safety*, 2018. Vol. 27. No. 7–8. Pp. 32–42. (rus). DOI: 10.18322/pvb.2018.27.7-8.32-42. EDN: XYXVHN.
13. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kul'kov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy [Polymer composite materials]*: monograph. Dolgoprudny: Intellect, 2010. 352 p. (rus). ISBN 978-5-91559-045-7.
14. Ushkov V.A. Vosplamennayaemost' i dymobrazuyushchaya sposobnost' polimernykh kompozitsionnykh materialov [Inflammability and smoke-generating ability of polymer composite materials]. *Vestnik MGSU*, 2017. Vol. 12, No. 8 (107). Pp. 897–903. (rus). EDN: ZFBXXR.
15. Lomakin S.M., Zaikov G.E., Mikitaev A.K., Kochnev A.M., Stoyanov O.V., Shkodich V.F., Naumov S.V. Zamedliteli goreniya dlya polimerov [Combustion retardants for polymers]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012. Vol. 15, No. 7. Pp. 71–86. (rus). EDN: LXNTRB.
16. Ushkov V.A. *Razrabotka nauchnykh osnov polucheniya polimernykh stroitel'nykh materialov s ponizhennoy pozharnoy opasnost'yu [Development of scientific bases for obtaining polymeric building materials with reduced fire hazard]*: Grand PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.16.09. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Moscow, 2020. 46 p. (rus)
17. Zhirikova Z.M., Aloev V.Z., Tarchokova M.A. Ognestoykost' polimernykh materialov i sposoby ee povysheniya [Fire resistance of polymeric materials and methods of their improvements]. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov*, 2019. No. 3 (25). Pp. 43–48. (rus). EDN: MYEGQE.
18. Vlasenko F.S., Raskutin A.E. Primenenie polimernykh kompozitsionnykh materialov v stroitel'nykh konstruktsiyakh [Applying frp in building structures]. *Trudy VIAM*, 2013. No. 8. Article 3. EDN: RAEFMB.
19. Garashchenko A.N., Rudzinskiy V.P., Kaledin V.O. Obespechenie trebuyemykh pokazateley pozharobezopasnosti konstruktsiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov s pomoshch'yu ognezashchity [Use of fire protection for reducing fire hazard of polymer composites and structures on their basis]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2013. No. 8 (145). Pp. 143–149. EDN: RAJJBN.
20. Kodolov V.I. *Goryuchest' i ognestoykost' polimernykh materialov [Flammability and fire resistance of polymer materials]*. Moscow: Khimiya, 1976. 160 p. (rus)
21. Dudchenko A.A., Lur'e S.A., Obratsov I.F. Anizotropnye mnogosloynnye plastiny i obolochki [Anisotropic multilayer plates and shells]. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya: Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela*. Moscow: VINITI, 1983. Vol. 15. Pp. 3–68. (rus)
22. Petryuk I.P. *Materialovedenie. Polimernye materialy i kompozity [Materials science. Polymer materials and composites]*: tutorial: in 2 parts. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2011. Part 1. 68 p. (rus). ISBN 978-5-9948-0852-8.
23. Romanenkov I.G., Levites F.A. *Ognezashchita stroitel'nykh konstruktsiy [Fire protection of building structures]*. Moscow: Stroyizdat, 1991. 320 p. (rus)
24. Albert C.M., Liew K.C. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites: A 10-year review from 2012 to 2021. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2024. Vol. 9, Iss. 1. P. 27–42. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004.
25. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Eksperimental'nye i analiticheskie issledovaniya ognestoykosti sploshnoy betonnoy plity so stal'noy i kompozitnoy armaturoy [Experimental and analytical researches into fire resistance of continuous concrete slab with steel and composite reinforcement]. *Fire Safety*, 2013. No. 2. Pp. 44–51. (rus). EDN: QZBNQX.
26. Shirko A.V., Kamlyuk A.N., Spiglazov A.V., Drobysh A.S. Opredelenie mekhanicheskikh svoystv kompozitnoy armatury s uchetom temperaturnogo vozdeystviya [Composite reinforcement strength and stiffness analysis in temperature field view]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2015. No. 2 (31). Pp. 59–65. (rus). EDN: TWAIDH.
27. Kamlyuk A.N., Shirko A.V., Spiglazov A.V., Drobysh A.S. Vliyanie teplovogo vozdeystviya pozhara na mekhanicheskie svoystva kompozitnoy armatury [Influence of thermal effects of fire on mechanical properties composite reinforcement] *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2015. No. 2 (22). Pp. 4–11. (rus). EDN: UHHCAD.

28. Borisova T.A., Zinnurov T.A., Kuklin A.N. Issledovanie vliyaniya temperaturnogo vozdeystviya na rabotu stekloplastikovoy armatury v betonnykh konstruktsiyakh [Investigation of the influence of temperature impact on the work of fiberglass reinforcement in concrete structures]. *News of the KSUAE*, 2018. No. 2 (44). Pp. 136–144. (rus). EDN: XQCNJJ.
29. Aseeva R.M., Zaikov G.E. *Snizhenie goryuchesti polimernykh materialov [Reducing the flammability of polymer materials]*. Moscow: Znanie, 1981. 64 p. (rus)
30. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kul'kov A.A. Sposoby i sredstva obespecheniya trebuemykh pokazateley pozharobezопасnosti konstruktсий iz polimernykh kompozitov (obzor) [Methods and means for providing required fire-safety indices of polymer composite structures]. *Fire and Explosion Safety*, 2019. Vol. 28, No. 2. Pp. 9–30. (rus). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30. EDN: FLHRNA.
31. Kablov V.F. Keybal N.A., Bondarenko S.N., Lobanova M.S., Garashchenko A.N., Zaikov G.E. Issledovanie effektivnosti ogneplozashchitnogo vspuchivayushchegosya pokrytiya na osnove perkhlorvinilovoy smoly dlya stekloplastika [Investigation of the effectiveness of a fire-heat-protective swelling coating based on perchlorovinyl resin for fiberglass]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013. Vol. 16, No. 13. Pp. 119–122. (rus). EDN: QLQCEZ.
32. Garashchenko A.N., Sukhanov A.V., Garashchenko N.A., Rudzinskiy V.P., Marakhovskiy S.S. Ogneshchita konstruktсий iz polimernykh kompozitov i otsenka ee effektivnosti [Fire protection of structures made of polymer composites and evaluation of its effectiveness]. *Fire and Explosion Safety*, 2009. Vol. 18, No. 5. Pp. 15–24. (rus). EDN: KTYGMD.
33. Garashchenko N.A. Ogneshchita konstruktсий iz polimernykh kompozitov i otsenka ee effektivnosti [Fire protection of structures made of polymer composites and evaluation of its effectiveness]. *Fire and Explosion Safety*, 2006. Vol. 15, No. 2. Pp. 12–16. (rus). EDN: HUIZXV.
34. Kudryashov V.A., Ivanov Yu.S., Drobysh A.S., Yatsukovich A.G. Metodika otsenki ognestoykosti polimernykh kompozitnykh materialov i parametrov neobkhodimoy ogneshchity [Methods of assessing the fire resistance of polymer composite materials and parameters of necessary fire protection]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2015. No. 1 (37). Pp. 55–65. (rus). EDN: WDKVQH.
35. Pavlov V.V. *Prochnost' konstruktсий iz stekloplastikov pri povyshennykh i vysokikh temperaturakh [Strength of fiberglass structures at elevated and high temperatures]*. Grand PhD tech sci. diss. synopsis: 01.02.06. Ufa State Technical Aviation University. Ufa, 2005. 32 p. (rus)
36. Kudryashov V.A., Drobysh A.S., Solov'yanchik A.M. Rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy ognestoykosti polimernykh kompozitnykh materialov, armirovannykh steklovoloknom [Results of experimental researches fire resistance of polymer composite materials reinforced with fiberglass]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2015. No. 1 (21). Pp. 17–24. (rus). EDN: TKPYGP.
37. Korol'chenko A.Ya., Garashchenko A.N., Garashchenko N.A., Rudzinskiy V.P. Raschety tolshchin ogneshchity, obespechivayushchikh trebuemye pokazateli pozharoy opasnosti derevokleennykh konstruktсий [Calculations of fire protection thicknesses providing the required fire hazard indicators of wood-glued structures]. *Fire and Explosion Safety*, 2008. Vol. 17, No. 3. Pp. 49–56. (rus). EDN: KNUAMJ.
38. Basakovich I.A., Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Osyayev V.A., Palevoda I.I. Ogneshchitnaya effektivnost' gipsovykh plit Knauf Fireboard dlya vertikal'nykh stal'nykh profiley razlichnogo sortamenta [Knauf Fireboard fire protection efficiency for vertical steel profiles of various cross section shapes]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 3. Pp. 268–282. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.268. EDN: JCWJCS.
39. Kudryashov V.A., Polevoda I.I., Drobysh A.S., Solov'yanchik A.M. Eksperimental'nye issledovaniya ognestoykosti polimernykh kompozitnykh konstruktсий s ogneshchitoy [Experimental researches fire resistance of polymer composite structures with fire protection]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (21). Pp. 25–29. (rus). EDN: TKPYGZ.

Copyright © 2024 Kudryashov V.A., Drobysh A.S.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

МАССОГАБАРИТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ДЛЯ ОТРАБОТКИ НАВЫКОВ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Полевода И.И., Кобяк В.В., Линник Д.А., Опекун Е.В.,
Пивоваров А.В., Бузук А.В., Коробочка Д.Н.

Цель. Создать массогабаритную модель (далее – МГМ) на базе существующего электромобиля для отработки действий спасателей-пожарных по ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий и пожаров с участием легкового автомобильного транспорта с электроприводом (далее – электромобили).

Методы. Теоретический анализ, моделирование.

Результаты. Описаны конструктивные требования, предъявляемые к МГМ. Разработана и изготовлена МГМ, имитирующая основные модули наиболее популярных электромоделей. Представлен алгоритм проведения практических занятий по отработке действий по деблокированию пострадавших из салона электромобиля и тушению пожара.

Область применения исследований. Разработанная МГМ может использоваться в образовательном процессе при подготовке специалистов по образовательным стандартам специальностей 6-05-1033-01 (1-94 01 01) «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций», а также при переподготовке руководящих работников и специалистов, имеющих высшее образование, профессиональной подготовке рабочих (служащих) по профессии спасатель-пожарный, организации курсов повышения квалификации по программе «Аварийно-спасательные работы на транспорте».

Ключевые слова: электромобиль, массогабаритная модель, спасатель-пожарный, Nissan Leaf первого поколения, аварийно-спасательные работы, чрезвычайная ситуация, деблокирование, тушение.

(Поступила в редакцию 10 октября 2024 г.)

Введение

В настоящее время автопроизводители выпускают автомобили, оснащенные двигателями внутреннего сгорания (далее – ДВС), а также гибридными и электрическими приводами. Электромобиль в сравнении с автомобилем, оснащенный ДВС, обладает следующими преимуществами: более высокая эффективность, сокращение выбросов парниковых газов и вредных веществ, снижение уровня загрязнения воздуха, улучшение городской среды [1].

Наиболее популярными моделями электромоделей в Республике Беларусь являются такие модели, как Nissan Leaf I и II, BMW i3 и i8, Tesla (Model 3, Model Y, Model X, Model S), Hyundai Ioniq и Kona, Audi e-tron, Citroën C-Zero, Fiat E500, Ford Focus, JAC e-S2, Jaguar I-Pace, Kia Soul, Mazda MX-30, Mercedes-Benz EQC 400, Peugeot ION, Opel Ampera-e, Porsche Taycan, Renault Zoe, Smart Fortwo, Volkswagen e-Golf, Mitsubishi i-MiEV, Nissan e-NV200 и другие.

В 2023 г. глобальные продажи электрифицированных автомобилей составили около 13,6 млн единиц, что на 31 % больше, чем в предыдущем году. Этот рост свидетельствует о повышении интереса к экологически чистым и экономичным транспортным средствам, а также о развитии инфраструктуры и технологий для их обслуживания¹ [2].

Следует отметить, что ликвидация чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) с участием электромоделей до сих пор является актуальной задачей для спасателей-пожарных. Для быстрого и безопасного тушения горящего электромобиля, деблокирования пострадавших необходимо иметь специальные навыки и оборудование, а также обладать знаниями

¹ Электромобили (мировой рынок) // TAdviser: портал выбора технологий и поставщиков. – 2024. – 7 июня. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Электромобили_\(мировой_рынок\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Электромобили_(мировой_рынок)) (дата обращения: 12.02.2023).

о конструктивных особенностях и инженерных коммуникациях электромобиля. При этом статистика ЧС на электротранспорте показывает, что в 2021 г. на каждые 100 тыс. проданных электромобилей приходилось около 25 возгораний. Для автомобилей с ДВС этот показатель увеличивается до 1500, а наихудшие данные у гибридов – около 3500 инцидентов на 100 тыс. проданных машин [2].

Электромобили различаются по расположению высоковольтных батарей, систем электроники и безопасности. Автопроизводители используют различные системы отключения тяговых аккумуляторных батарей при авариях. Вследствие того, что одна и та же модель автомобиля может оснащаться как ДВС, так и электродвигателями, возникают значительные риски для спасателей-пожарных при ликвидации дорожно-транспортных происшествий (далее – ДТП), т.к. действия, отработанные на автомобилях с ДВС, представляют опасность при работе с электромобилями.

В Республике Беларусь в настоящее время недостаточно информации о конструктивных особенностях существующих электромобилей, а также рекомендуемой последовательности действий (алгоритма) спасателей-пожарных, относящейся непосредственно к данному транспортному средству (далее – ТС), с детализацией их действий, в том числе по извлечению пострадавших из ТС.

Анализ схем расположения модулей существующих электромобилей позволяет выявить некоторые закономерности размещения основных силовых модулей. Так, литий-ионные тяговые аккумуляторные батареи, как правило, расположены на уровне колесной базы в разных частях автомобиля; на всех электромобилях отключение систем высокого напряжения производится посредством размыкания электрической сети напряжением 12 В; усиленные элементы в них расположены в большинстве случаев в местах их аналогичного расположения в автомобилях, оборудованных ДВС в качестве единственного источника движения.

Исходя из всего перечисленного, а также на основе зарубежной практики тушения электромобилей, можно сделать вывод, что при создании МГМ для подготовки спасателей-пожарных действиям по ликвидации ЧС на легковом автомобильном транспорте с электроприводом особо значимым является вопрос идентификации расположения основных узлов и агрегатов ТС как в пути следования к месту вызова, так и на месте происшествия. Для эффективного и безопасного тушения горящего электромобиля, деблокирования пострадавших необходимо иметь специальные навыки и оборудование, а также обладать знаниями о конструктивных особенностях и инженерных коммуникациях электромобилей.

Для обучения и отработки навыков по ликвидации ЧС с участием электромобилей была разработана и изготовлена МГМ электромобиля на базе шасси Nissan Leaf первого поколения (рис. 1), которая была дополнена идентичными муляжами для трех наиболее распространенных в Республике Беларусь моделей электромобилей, имеющих схожую с Nissan Leaf первого поколения конструкцию (BMW i3, Hyundai Ioniq, Fiat 500e).



Рисунок 1. – Внешний вид легкового автомобиля с электроприводом Nissan Leaf первого поколения

Моделирование МГМ осуществлялась с учетом следующих конструктивных особенностей:

- использованы магнитные эмблемы (Nissan Leaf первого поколения, BMW i3, Hyundai Ioniq, Fiat 500e) спереди и сзади МГМ;
- для многократного отработки действий по деблокированию пострадавших из салона ТС предусмотрено наличие элементов съема крыла (рис. 2);



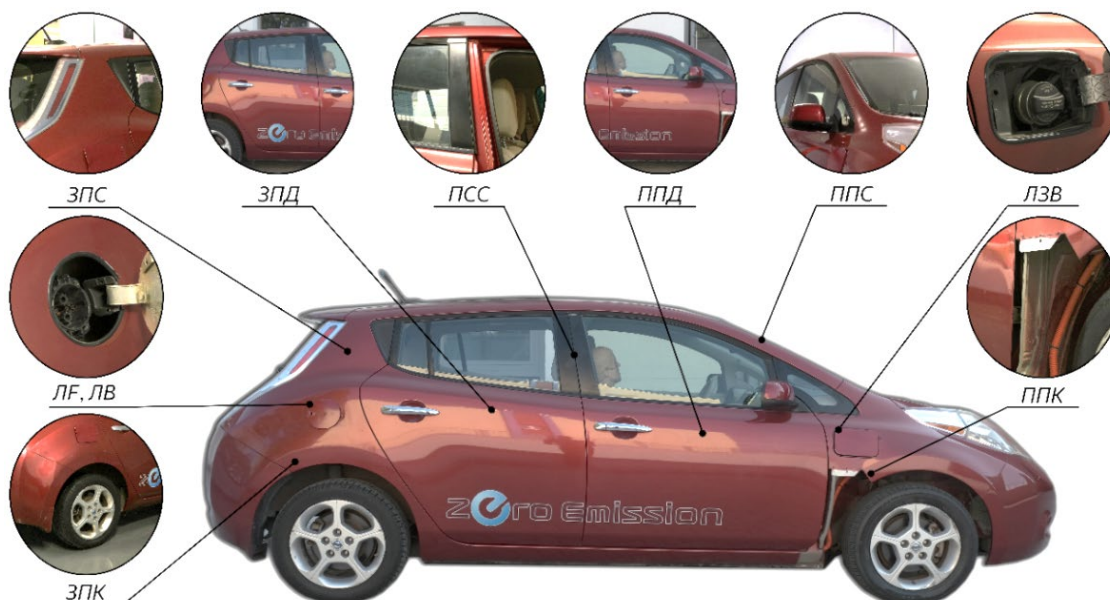
Рисунок 2. – Переднее левое крыло МГМ электромобиля

– также предусмотрено наличие элементов съема дверей для многократной отработки действий по деблокированию пострадавших из салона ТС, при этом работоспособность 12-вольтовой электрической сети не нарушена (например, для работы стеклоподъемников, центральных замков и др.);

– снаружи МГМ предусмотрены открывающиеся лючки для имитации подзарядки в зависимости от модели ТС (BMW i3 (рис. 3), Hyundai Ioniq (рис. 4), Fiat 500e (рис. 3));

– в переднем правом крыле МГМ предусмотрено наличие открывающегося лючка с заливной горловиной для имитации заправки топливом, а также установлен муляж бензобака, как у BMW i3, и обеспечен доступ к его осмотру (рис. 3);

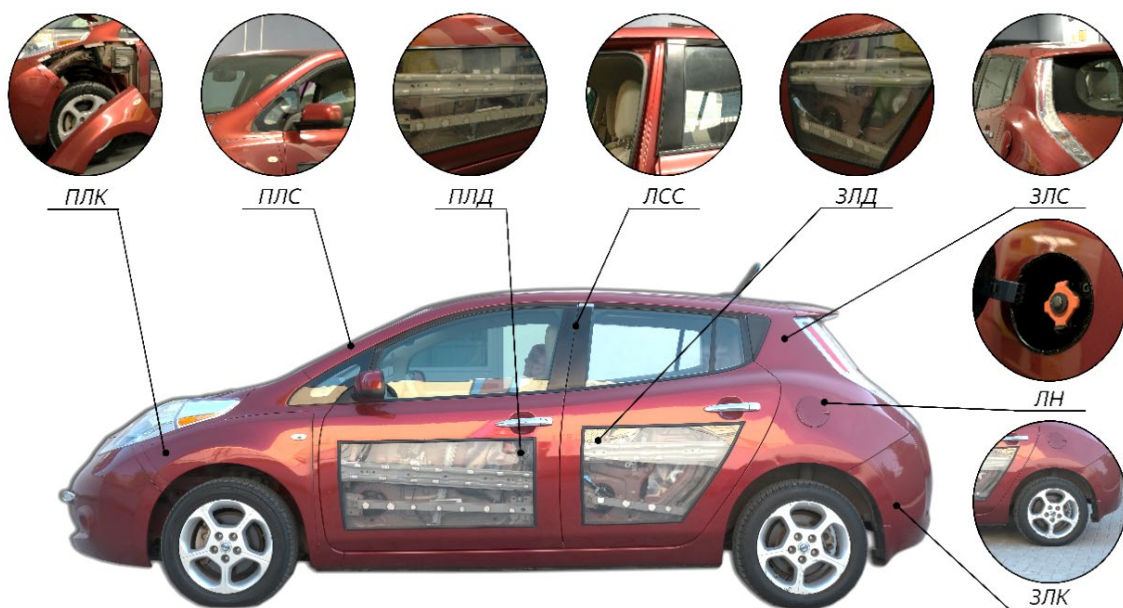
– для моделирования Tesla Model 3 предусмотрено наличие элементов съема крыла для осмотра силовых кабелей;



ЗПК – заднее правое крыло; ЛФ и ЛВ – лючок имитации подзарядки Fiat 500e и BMW i3;
 ЗПС – задняя правая стойка; ЗПД – задняя правая дверь; ПСС – правая средняя стойка;
 ППД – передняя правая дверь; ППС – передняя правая стойка; ЛЗВ – лючок с заливной горловиной для имитации заправки топливом BMW i3; ППК – переднее правое крыло

Рисунок 3. – Вид МГМ электромобиля справа

- в зависимости от модели ТС (BMW i3, Hyundai Ioniq, Fiat 500e) предусмотрены различные места расположения 12-вольтовой батареи;
- для изучения внутренней конструкции дверей (рис. 4) передняя левая и задняя левая двери МГМ снаружи выполнены со смотровыми окнами из стеклопластика;



ПЛК – переднее левое крыло; ПЛС – передняя левая стойка; ПЛД – передняя левая дверь со смотровыми окнами; ЛСС – левая средняя стойка; ЗЛД – задняя левая дверь со смотровыми окнами; ЗЛС – задняя левая стойка; ЛН – лючок имитации подзарядки Hyundai Ioniq; ЗЛК – заднее левое крыло

Рисунок 4. – Вид МГМ электромобиля слева

- в капоте МГМ выполнен открытый вырез для наглядной демонстрации основных силовых элементов (рис. 5), а также предусмотрено наличие элементов съема капота для многократного отработывания действий по обесточиванию ТС;



ПБ – передний бампер; ЛН – лючок подзарядки Nissan Leaf первого поколения; К – капот

Рисунок 5. – Вид МГМ электромобиля спереди

- предусмотрено наличие элементов съема крышки багажника для многократного отработывания действий по деблокированию пострадавших из салона ТС (рис. 6);
- на крыше МГМ предусмотрено расположение муляжа солнечной батареи, а также изнутри салона предусмотрено смотровое окно для обзора прохождения кабеля в задней левой стойке.

В багажном отсеке МГМ (рис. 7) обеспечена визуализация мест расположения муляжей электродвигателя, инверторов и сервисных разъемов для ТС, имеющих схожую с Nissan Leaf первого поколения конструкцию (BMW i3, Hyundai Ioniq, Fiat 500e).



ЗБ – задний бампер; KB – крышка багажника
Рисунок 6. – Вид МГМ электромобиля сзади



Рисунок 7. – Багажный отсек МГМ электромобиля

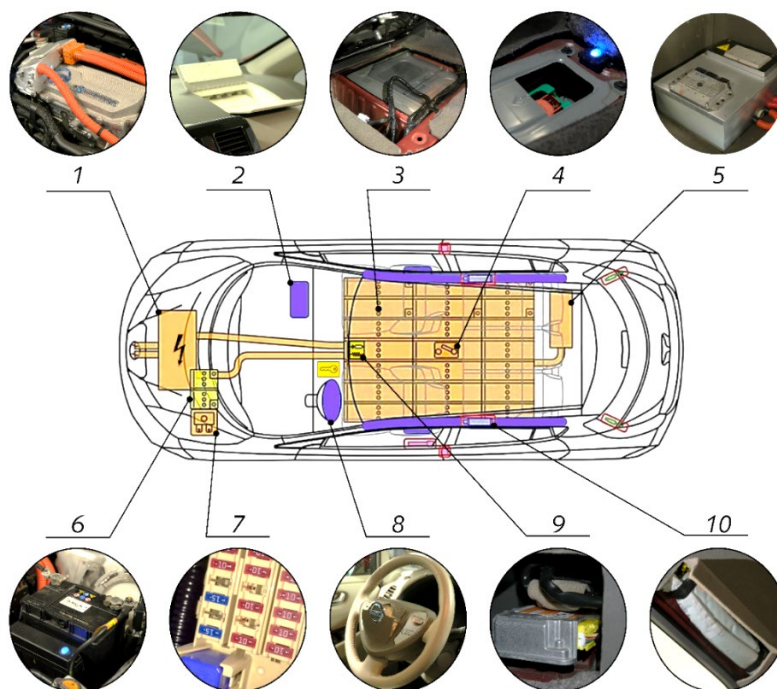
Для осмотра обзора высоковольтной батареи на полу салона МГМ в месте расположения высоковольтной батареи справа под пассажирским сиденьем предусмотрено смотровое окно (рис. 8).

Для осмотра обзора мест расположения газогенераторов подушек безопасности боковых, водителя на рулевом колесе и пассажира на приборной панели предусмотрены открывающиеся лючки (рис. 8).

В салоне МГМ имеются смотровые окна (вырезы) для обзора мест расположения (рис. 8):

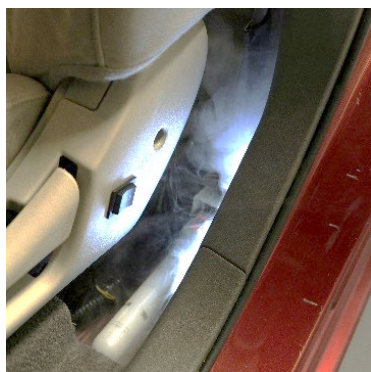
- пиротехнических патронов (изделий);
- преднатяжителей ремней;
- сервисных разъемов;
- мест прохождения высоковольтных кабелей.

Для отработки различных вариантов пожара предусмотрена светодиодная индикация для имитации возгорания и задымления в салоне (рис. 9а), подкапотном пространстве (рис. 9б) и под МГМ электромобиля (рис. 9в), а также создан щиток управления приборами.

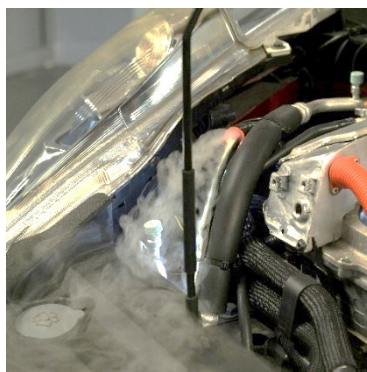


1 – инвертор; 2 – подушка безопасности пассажира; 3 – модуль силовой батареи; 4 – сервисный разъем;
5 – муляжи электродвигателя и инвертора; 6 – 12 В АКБ; 7 – блок предохранителей;
8 – подушка безопасности водителя; 9 – блок SRS; 10 – боковая подушка безопасности

Рисунок 8. – Аварийная карточка МГМ электромобиля с расположением токоведущих элементов и подушек безопасности



а – в салоне



б – в подкапотном пространстве



в – под МГМ электромобиля

Рисунок 9. – Места имитации возгорания и задымления МГМ электромобиля

Алгоритм проведения практического занятия по ликвидации последствий ДТП с участием МГМ электромобиля. При проведении практических занятий предусмотрена отработка следующих сценариев:

Сценарий 1. Ликвидация пожара в подкапотном пространстве МГМ.

Сценарий 2. Ликвидация пожара в салоне МГМ.

Сценарий 3. Ликвидация пожара силовой батареи МГМ.

Сценарий 4. Ликвидация пожара при зарядке МГМ.

Сценарии 1–3 отрабатываются совместно с деблокированием пострадавшего из салона МГМ.

Общий алгоритм практических занятий состоит из следующих этапов:

1. Идентификация ТС.

2. Стабилизация, обездвиживание, подъем ТС.

3. Приведение электрических приводов оборудования ТС в положение, не препятствующее извлечению пострадавшего из салона.

4. Отключение линий низкого напряжения ТС путем их резки или извлечения предохранителей или сервисных разъемов.

5. Проведение деблокирования пострадавшего с учетом конструктивных особенностей ТС.

6. Имитация ликвидации возгорания.

Отработка данного алгоритма производится при взаимодействии с программным обеспечением автоматизированной информационной системы «BY Rescue» (далее – АИС «BY Rescue»).

На первом этапе с момента получения информации о ДТП обучающийся узнает данные о модели электромобиля и его техническом состоянии. До прибытия к месту вызова изучает аварийную карточку данного ТС, которая находится на планшете или другом Android-устройстве (АИС «BY Rescue»). В данном приложении в зависимости от модели электромобиля находится информация о расположении основных его компонентов (тяговой батареи, инвертора, силовых кабелей, предохранителей, АКБ), местах аварийного отключения питания (места перекусывания линий низкого напряжения, отключения предохранителей, сервисных разъемов), мест установки домкратов и упоров, а также местах непосредственного воздействия аварийно-спасательного инструмента для проведения работ по снятию конструктивных элементов ТС (передних и задних дверных проемов, крышки капота и багажника, резки передних, средних и задних стоек) для деблокирования пострадавших.

На втором этапе (если ТС идентифицировано) обучающийся непосредственно приступает к проведению аварийно-спасательных работ, включающих правильность стабилизации, обездвиживания и подъема ТС, отключение линий низкого и высокого напряжений, имитацию работы с гидравлическим инструментом, деблокирование пострадавшего из салона ТС и имитацию тушения.

В случае когда по пути следования отсутствует информация о модели и типе ТС, то по приезде к месту ДТП обучающийся идентифицирует модель и тип ТС по внешним признакам. Весь алгоритм работ при проведении практических занятий по ликвидации последствий ДТП с участием электротранспорта приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Алгоритм проведения аварийно-спасательных работ

№ п/п	Виды работ	Действия обучающегося
<i>При следовании к месту ДТП</i>		
1	Идентификация ТС с помощью мобильного приложения АИС «BY Rescue»	Работа с интерактивными блоками мобильного приложения АИС «BY Rescue», изучение конструктивных особенностей ТС, местонахождения основных силовых электрических линий, мест размещения сервисных разъемов, предохранителей и других источников повышенной опасности (газогенераторы, пиропатроны, преднатяжители ремней безопасности)
<i>По прибытии к месту ДТП</i>		
2	Отработка действий по стабилизации ТС	Производится ограждение зоны ДТП. С помощью противооткатных упоров, клиньев или подручных средств осуществляется стабилизация (фиксация) ТС. При необходимости используется интерактивный блок «Стабилизация, обездвиживание, подъем ТС» мобильного приложения АИС «BY Rescue»
3	Отработка действий по обездвиживанию ТС	Производится переключение селектора трансмиссии в положение «Р», включение стояночного тормоза, при необходимости разблокирование дверей, крышки багажника, капота, задействование стеклоподъемников, сидений, рулевой колонки и подголовников с электрическим приводом, отключение зажигания с помощью ключа или отнесением смарт-ключа на определенное расстояние. При необходимости используется интерактивный блок «Стабилизация, обездвиживание, подъем» мобильного приложения АИС «BY Rescue»

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Виды работ	Действия обучающегося
4	Отработка действий по подъему ТС	Устанавливаются домкраты в специально отведенных местах и производится подъем ТС. При необходимости используется интерактивный блок «Стабилизация, обездвиживание, подъем» мобильного приложения АИС «BY Rescue»
5	Отработка действий по отключению линий низкого напряжения ТС	Обучающиеся осуществляют отключение линий низкого напряжения ТС путем резки линий низкого напряжения 12 В АКБ, извлечения предохранителей или сервисных разъемов (вилки). При необходимости используется интерактивный блок «Отключение прямых опасностей» мобильного приложения АИС «BY Rescue»
6	Отработка действий по деблокированию пострадавших с учетом конструктивных особенностей ТС	Проводится имитация работы с аварийно-спасательным инструментом по демонтажу передних и задних дверей, резке передних, средних и задних стоек. Перед проведением работ определяются места расположения подушек и преднатяжителей ремней безопасности, пиропатронов. При необходимости используется интерактивный блок «Доступ к пострадавшим» мобильного приложения АИС «BY Rescue»
<i>Имитация тушения пожара после ДТП</i>		
7	Отработка действий по тушению электромобиля (загорание в подкапотном пространстве, в салоне, а также силовой батареи)	В зависимости от места возгорания осуществляют тушение электромобиля с учетом соблюдения правил безопасности. Работы производятся в средствах индивидуальной защиты органов дыхания, используются диэлектрические средства, производится заземление пожарных насосов и стволов. При необходимости используется интерактивный блок «В случае пожара» мобильного приложения АИС «BY Rescue»
8	Отработка действий по тушению электромобиля во время зарядки	С использованием средств индивидуальной защиты осуществляются аварийное отключение зарядки нажатием на красную кнопку, которая расположена на макете зарядной станции (рис. 10), и последующие действия по тушению ТС



Рисунок 10. – Внешний вид зарядной станции

Заключение

Разработанная МГМ представляет собой уникальное изделие в Республике Беларусь, предназначенное для формирования теоретических и практических навыков у обучающихся по ликвидации последствий ДТП с участием электротранспорта. Совершенствование подготовки спасателей с использованием МГМ позволит систематизировать действия спасателей при различных ЧС на транспорте, отработать до автоматизма алгоритмы их действий с учетом многообразия конструкций электромобилей разного модельного ряда, что позволит уменьшить число пострадавших и причиненный ущерб.

Воспроизводимые сценарии позволят в безопасной среде познакомить обучающегося с последствиями наиболее частых ошибок, совершаемых при ликвидации последствий ДТП и тушении пожара на электротранспорте.

Работа выполнена в рамках задания 9 «Разработать многофункциональный тренажерный комплекс для подготовки спасателей-пожарных к действиям по ликвидации чрезвычайных ситуаций на легковом автомобильном транспорте с электроприводом» государственной научно-технической программы «Современные технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» на 2021–2025 гг. (государственная регистрация № 20221930).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобяк, В.В. Разработка многофункционального тренажерного комплекса для ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий на электротранспорте / В.В. Кобяк, В.Е. Бабич, В.В. Кессо [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т. 7, № 1. – С. 75–85. – DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.75. – EDN: KСATEM.
2. Канонин, Ю.Н. Пожарная опасность электромобилей / Ю.Н. Канонин, А.В. Лыщик // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 1. – С. 38–51. – DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38–51. – EDN: ZJAQXG.

Массогабаритная модель электромобиля для отработки навыков ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий

Mass-size model of an electric vehicle for practicing skills of elimination of consequences of road accidents

Полевода Иван Иванович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь»,
начальник университета

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: ip@ucp.by
SPIN-код: 1662-9457

Ivan I. Palevoda

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Head of University

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: ip@ucp.by
ORCID: 0000-0003-2469-3553

Кобяк Валерий Викторович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра ликвидации
чрезвычайных ситуаций, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: valkobkii@gmail.com
SPIN-код: 7828-1103

Valeriy V. Kobyak

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Elimination,
Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: valkobkii@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5989-5465

Линник Дмитрий Александрович

Учреждение образования
«Гродненский государственный
университет имени Янки Купалы»,
кафедра машиноведения и технической
эксплуатации автомобилей, доцент

Адрес: ул. Ожешко, 22,
230023, г. Гродно, Беларусь
Email: d.linnik@grsu.by
SPIN-код: 6018-8876

Dmitriy A. Linnik

Yanka Kupala State University of Grodno,
Chair of Machine Science
and Technical Operation of Cars,
Associate Professor

Address: Ozheshko str., 22,
230023, Grodno, Belarus
Email: d.linnik@grsu.by

Опекун Елена Владимировна

Учреждение образования
«Гродненский государственный
университет имени Янки Купалы»,
центр трансфера технологий, начальник центра

Адрес: ул. Ожешко, 22,
230023, г. Гродно, Беларусь
Email: opekoun@grsu.by

Elena V. Opekun

Yanka Kupala State University of Grodno,
Technology Transfer Center,
Head of the Center

Address: Ozheshko str., 22,
230023, Grodno, Belarus
Email: opekoun@grsu.by
ORCID: 0000-0002-5330-8266

Пивоваров Александр Вадимович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра ликвидации
чрезвычайных ситуаций, преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: sasha1500vo@list.ru

SPIN-код: 5506-5244

Aleksandr V. Pivovarov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Elimination,
Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: sasha1500vo@list.ru

ORCID: 0009-0006-5876-9949

Бузук Александр Вячеславович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», отдел организации
подготовки руководящих работников
и специалистов в области защиты
от чрезвычайных ситуаций, начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: uk007@rambler.ru

Aleksandr V. Buzuk

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Department of Organization of Training
of Top-Level Officials and Specialists
in the Field of Emergency Protection,
Head of Department

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: uk007@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-8356-9977

Коробочка Дмитрий Николаевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
предупреждения и ликвидации
чрезвычайных ситуаций, курсант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: taktik@ucp.by

Dmitriy N. Korobochka

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Emergency Prevention and Elimination,
cadet

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: taktik@ucp.by

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-4.411>

EDN: <https://elibrary.ru/DRWSYH>

MASS-SIZE MODEL OF AN ELECTRIC VEHICLE FOR PRACTICING SKILLS OF ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF ROAD ACCIDENTS

**Palevoda I.I., Kobyak V.V., Linnik D.A., Opekun E.V.,
Pivovarov A.V., Buzuk A.V., Korobochka D.N.**

Purpose. To create a mass-size model (hereinafter – MSM) on the basis of an existing electric vehicle for practicing the actions of rescue-firefighters to eliminate the consequences of road accidents and fires involving electric-powered cars (hereinafter – electric cars).

Methods. Theoretical analysis, modeling.

Findings. The design requirements for the MSM are described. The MSM simulating the main modules of the most popular electric cars is developed and manufactured. The algorithm of practical exercises for practicing the actions of releasing victims from the cabin of an electric car and fire extinguishing is presented.

Application field of research. The developed MGM can be used in the educational process in the training of specialists under the educational standards of specialties 6-05-1033-01 (1-94 01 01) «Prevention and elimination of emergency situations», as well as in the retraining of managers and specialists with higher education, professional training of workers (employees) in the profession of rescuer-firefighter, organization of advanced training courses on the program «Emergency rescue work in transport».

Keywords: electric cars, mass-size model, rescuer-firefighter, Nissan Leaf of the first generation, rescue work, emergency situation, releasing, extinguishing.

(The date of submitting: October 10, 2024)

REFERENCES

1. Kobyak V.V., Babich V.E., Kesso V.V., Sak S.P., Skorupich I.S. Razrabotka mnogofunktsional'nogo trenazhernogo kompleksa dlya likvidatsii posledstviy dorozhno-transportnykh proisshestviy na elektro-transporte [Development of a multifunctional training complex for the elimination of consequences of road accidents in electric transport]. *Journal of Civil Protection*, 2023. Vol. 7, No. 1. Pp. 75–85. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-1.75. EDN: KCATEM.
2. Kanonin Yu.N., Lyshchik A.V. Pozharnaya opasnost' elektromobiley [Fire danger of electric vehicles]. *Bulletin of Scientific Research Results*, 2023. No. 1. Pp. 38–51. (rus). DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51. EDN: ZJAQXG.

Copyright © 2024 Palevoda I.I., Kobyak V.V., Linnik D.A., Opekun E.V.,
Pivovarov A.V., Buzuk A.V., Korobochka D.N.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРНОГО СОСТАВА МЕТАЛЛОФОСФАТНЫХ ОГНЕЗАМЕДЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОГНЕЗАЩИТНОЙ ОТДЕЛКИ ПОЛИЭФИРНЫХ ТКАНЕЙ К ГИДРОЛИЗНОЙ ОБРАБОТКЕ

Богданова В.В., Кобец О.И., Рева О.В.

Цель. Разработка рецептурного состава металлофосфатных огнезамедлительных систем (ОЗС) в виде устойчивых коллойдосодержащих растворов и исследование влияния модифицирующих добавок на устойчивость огнезащитной отделки полиэфирных тканей к гидролизной обработке (стирке).

Методы. Золь-гель метод синтеза металлофосфатных ОЗС, лабораторные и стандартные методики огнезащитной отделки, гидролизной обработки и огневых испытаний образцов полиэфирных тканых материалов, просвечивающая электронная микроскопия, комплексный термический анализ (дифференциальная сканирующая калориметрия – ДСК и термогравиметрия – ТГ).

Результаты. Золь-гель методом получены ОЗС на основе металлофосфатных кислот концентрированных растворов (связок). Определены условия синтеза – природа и соотношения основных компонентов Ме-фосфатных связок (Ме – Ca, Sn, Al, Zn или Ba), концентрация нейтрализующих агентов (NaHCO_3 или $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и модификаторов (полиакриламид (ПАА), коллоидный раствор SnCl_2 , гексаметиленetetрамин (ГМТА), NH_4Cl , карбамид (КМ)), кислотность среды, позволяющие получить ОЗС в виде агрегативно устойчивых растворов. Показано, что достижение стойкого к гидролизной обработке огнезащитного эффекта обусловлено прочным закреплением на ткани замедлителей горения на основе Са-фосфатной связки в присутствии отобранных модифицирующих добавок – диспергирующей и/или медиативной (ПАА и/или водный коллоидный раствор SnCl_2). Лучшему закреплению эффективных модифицированных ОЗС способствует наличие в их растворах нанодисперсных (10–20 нм) соединений кальция и олова. Стойкость к гидролизной обработке огнезащитной отделки подтверждена данными ДСК и ТГ: для огнезащищенной модифицированным составом ткани (как после гидролизной обработки, так и без нее) снижается суммарное тепловыделение (до 1,5 раз) с одновременным уменьшением общей потери массы образцов по сравнению с исходным полиэфирным тканым материалом.

Область применения исследований. Экспериментальные данные могут быть использованы для придания устойчивой к гидролизной обработке огнезащитной отделки полиэфирным тканым материалам низкой плотности. Полученные результаты позволяют определить пути регулирования эффективности известных и разрабатываемых новых фосфатных ОЗС для устойчивой к стиркам огнезащитной отделки полиэфирных тканей.

Ключевые слова: металлофосфатные огнезамедлительные системы, модифицирующие добавки, полиэфирный тканый материал, огнезащитная отделка, гидролизная обработка.

(Поступила в редакцию 1 октября 2024 г.)

Введение

Большинство выпускаемых промышленностью химических волокон (в том числе полиэфирных) и текстильных материалов на их основе легковоспламеняемы и способны к распространению пламени. Для снижения пожарной опасности текстильных материалов в настоящее время применяют такие основные методы, как синтез новых негорючих волокнообразующих полимеров, химическую модификацию существующих полимеров, введение в полимеры на стадии получения или переработки замедлителей горения – антипиренов, поверхностную отделку волокон, текстильных материалов и изделий огнезащитными составами, а также сочетание этих способов [1; 2].

Наиболее простым и экономичным методом увеличения огнестойкости различных тканых материалов из полиэфирных, хлопчатобумажных или смесовых волокон при сохранении их физико-химических свойств является поверхностная отделка готовых тканей растворами ОЗС [1; 3]. Основными критериями выбора соединений и композиций для огнезащитной отделки текстильных материалов являются следующие: способность к образованию устойчивых растворов, в том числе коллоидных, нетоксичность, высокая эффективность огнезащитного действия при достаточно невысоких концентрациях [4–6]. Одновременно от ОЗС требуется хорошая адгезионная способность, усиливающая закрепление антипирена на ткани, что позволяет сохранить устойчивость к гидролизной обработке (стирке) [7]. Кроме того, огнезащитные составы не должны изменять внешний вид текстильного материала и прочностные свойства и быть экономически доступными. С учетом экологических требований указанным критериям в наибольшей степени отвечают азот-фосфорсодержащие соединения, а также антипиреновые композиции на их основе, содержащие дополнительно элементы-синергисты (галогены, металлы и/или бор) [3; 8; 9].

На основании литературных и ранее полученных экспериментальных данных установлено, что фосфаты металлов-аммония служат основой эффективных и экономичных ОЗС для целлюлозосодержащих, пенополиуретановых, а также нетканых полиэфирных материалов и оксадиазольных тканей [10–13]. Эти ОЗС экологически безопасны и могут быть синтезированы из доступного минерального сырья [14]. К тому же продукты синтеза, содержащие фосфаты двух-, трехвалентных металлов, полученные золь-гель методом, образуют большое количество соединений, состав и свойства которых возможно регулировать, изменяя соотношения и природу компонентов, их концентрацию, порядок введения реагентов в реакционную смесь, температуру, кислотность (pH) среды [10; 15]. Кроме того, при введении в реакционную смесь катионов поливалентных металлов может быть снижено дымовыделение при горении огнезащищенных тканых материалов [16].

Для огнезащитной обработки тканей ОЗС на основе металлофосфатов желательно получать в виде водных коллоидосодержащих растворов, проявляющих хороший смачивающий эффект в отношении тканого материала, обладающих удовлетворительными адгезионными свойствами и способностью к пленкообразованию [4]. При обработке тканей растворами ОЗС также необходимо регулировать их кислотность в сторону более нейтральных значений ($pH \sim 4,5–5,5$), т.к. кислые химические реагенты в сочетании с температурным воздействием, как правило, применяемом в технологии придания тканым материалам требуемой огнестойкости, могут ухудшать физико-механические свойства полиэфирных волокон ткани из-за изменения их надмолекулярной структуры. Однако при pH 5 и выше металлофосфатные продукты синтеза, содержащие катионы кальция, магния и/или цинка, как показано в результате предыдущих исследований [13], обычно являются агрегативно неустойчивыми суспензиями, которые при старении расслаиваются с выпадением осадка. Из-за этого после гидролизной обработки (стирки) огнезащищенных тканых образцов в результате плохой адгезии суспензий и их вымывания с поверхности полиэфирных материалов можно ожидать снижение эффекта огнезащиты.

Цель данной статьи заключалась в разработке рецептурного состава металлофосфатных огнезамедлительных систем в виде устойчивых коллоидосодержащих растворов и исследовании влияния модифицирующих добавок на устойчивость огнезащитной отделки полиэфирных тканей к гидролизной обработке (стирке).

Основная часть

Методика эксперимента. Объектами исследований являлись ОЗС (табл. 1), полученные на основе устойчивых концентрированных кислых металлофосфатных растворов (связок), нейтрализованных растворами различных щелочных агентов индивидуально или в смеси (NaHCO_3 ; $\text{NaHCO}_3 + \text{KHCO}_3$; $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; $\text{NaHCO}_3 + \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; NaOH ; $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$) до

достижения pH 1–5. Металлофосфатные связки – кальций-фосфатная (Ca-Ф), олово-фосфатная (Sn-Ф), кальций-олово-фосфатная (Ca, Sn-Ф), алюминий-цинк-олово-фосфатная (Al, Zn, Sn-Ф), барий-фосфатная (Ba-Ф) получены при взаимодействии оксидов, гидроксидов или растворимых солей соответствующих металлов с фосфорной кислотой. В ходе синтеза ОЗС в реакционную смесь вводили также различные модифицирующие агенты. Нейтрализацию связок проводили таким образом, чтобы были получены ОЗС в виде агрегатно устойчивых растворов для увеличения их адгезионной способности и сохранения удовлетворительных эксплуатационных свойств полиэфирной ткани (прочность, мягкость, внешний вид).

Таблица 1. – Химический состав, введенные модифицирующие агенты, кислотность и агрегативная устойчивость ОЗС

Обозначение состава	Молярные соотношения основных компонентов ОЗС CaO : Al ₂ O ₃ : ZnO : BaO : P ₂ O ₅ : Na ₂ O : K ₂ O : CO ₂ : NH ₃ : : SnO : HCl : SiO ₂	Модифицирующий агент / pH	Примечания ³
ОЗС-1А	1 : 0 : 0 : 0 : 3 : 0,42 : 0 : 0,82 : 0 : 0 : 0 : 0	– / pH 0	Р
ОЗС-2А	1 : 0 : 0 : 0 : 3 : 0,82 : 0 : 1,64 : 0 : 0 : 0 : 0	– / pH 3	С (ос.)
ОЗС-3А	1 : 0 : 0 : 0 : 3 : 0,42 : 1,97 : 1,64 : 0 : 0 : 0 : 0	– / pH 3	С (ос.)
ОЗС-4А	1 : 0 : 0 : 0 : 3 : 0,49 : 0 : 0,82 : 0,16 ¹ : 0 : 0 : 0	Na-ЭДТА / pH 0	С (ос.)
ОЗС-5А	1 : 0 : 0 : 0 : 3 : 0,42 : 0 : 0,82 : 0 : 0 : 0 : 0	ПАА / pH 0	Р (мут.)
ОЗС-6А	1 : 0 : 0 : 0 : 3,1 : 0,42 : 1,97 : 4,76 : 0 : 0,7 : 1,4 ² : 0	SnCl ₂ (ИПС) / pH 3	Р (мут.)
ОЗС-7А	1 : 0 : 0 : 0 : 3,1 : 0,42 : 0 : 0,82 : 0 : 0,7 : 2,1 ² : 0	SnCl ₂ (в.) / pH 1	Р (мут.)
ОЗС-8А	1 : 0 : 0 : 0 : 3,1 : 0,42 : 0 : 0,82 : 0 : 1,05 : 3,2 ² : 0	SnCl ₂ (в.) / pH 0	Р
ОЗС-9А	1 : 0 : 0 : 0 : 3,1 : 0,42 : 0 : 0,82 : 0 : 0,7 : 2,1 ² : 0	SnCl ₂ (в.), ПАА / pH 1	Р
ОЗС-1Б	0 : 0 : 0 : 0 : 6,74 : 0 : 0 : 0 : 4,45 : 0,5 : 3 : 0	ПАА / pH 1	Р
ОЗС-2Б	0 : 0 : 0 : 0 : 6,74 : 0,43 : 0 : 0,86 : 2,97 : 0,5 : 3 : 0	ПАА / pH 2	С
ОЗС-3Б	0 : 0 : 0 : 0 : 6,74 : 0 : 0 : 0 : 3,96 : 0,5 : 3 : 3	ПАА, ЖС / pH 2	С
ОЗС-4Б	0 : 0 : 0 : 0 : 6,74 : 0 : 0 : 0 : 5,75 : 0,5 : 3 : 3	ПАА, ЖС / pH 5	С
ОЗС-1В	0,67 : 0 : 0 : 0 : 6,33 : 0,89 : 0 : 0,89 : 13,2 ¹ : 0,33 : 0,16 : 0	ГМТА, КМ, ПАА / pH 1	Р
ОЗС-2В	0,67 : 0 : 0 : 0 : 6,33 : 0,89 : 0 : 0,89 : 0,64 ¹ : 0,33 : 0,16 : 0	КМ, ПАА / pH 2	С
ОЗС-3В	0,67 : 0 : 0 : 0 : 6,33 : 0,89 : 0 : 0,89 : 5,77 ¹ : 0,33 : 0,16 : 0	ГМТА, ПАА / pH 2	С
ОЗС-4В	0,67 : 0 : 0 : 0 : 6,33 : 0,89 : 0 : 0,89 : 3,54 ¹ : 0,33 : 0,16 : 0	ДЭТА, ПАА / pH 2	С
ОЗС-1Г	0 : 0,25 : 0,5 : 0 : 4,73 : 0 : 0 : 0 : 5,4 : 0,25 : 0,8 ² : 0	– / pH 1	Р
ОЗС-2Г	0 : 0,25 : 0,5 : 0 : 4,73 : 2,26 : 0 : 4,52 : 0 : 0,25 : 0,8 ² : 0	– / pH 1	Р (св.), С (9 д.)
ОЗС-3Г	0 : 0,25 : 0,5 : 0 : 4,73 : 2,81 : 0 : 0 : 0 : 0,25 : 0,8 ² : 0	– / pH 1	Р (св.), С (7 д.)
ОЗС-4Г	0 : 0,25 : 0,5 : 0 : 4,73 : 1,94 : 0 : 0 : 5,26 : 0,25 : 0,8 ² : 0	– / pH 1	С
ОЗС-1Д	0 : 0 : 0 : 1 : 1,4 : 0 : 0 : 0 : 3,19 ¹ : 0 : 0,94 ² : 0	ПАА, NH ₄ Cl, ГМТА / pH 0–1	Р
ОЗС-2Д	0 : 0 : 0 : 1 : 1,4 : 0 : 0 : 0 : 6,51 ¹ : 0 : 0,94 ² : 0	ПАА, NH ₄ Cl, ГМТА / pH 5	С

Примечание. ¹ Суммарное содержание азота в пересчете на NH₃.

² Суммарное содержание хлора в пересчете на HCl.

³ Обозначения: С – суспензия; Р – раствор; Р (св.) – свежесинтезированный раствор; ос. – осадок; мут. – мутный раствор; С (9 д.) – раствор, превращающийся в суспензию через 9 дней.

Огнезащитная отделка ткани состояла из следующих стадий: подготовки тканого материала (образцы полиэфирной ткани с поверхностной плотностью 65 г/м² размером 7×14 см), отмывки ткани, приготовления рабочего раствора ОЗС, пропитки образцов раствором ОЗС (25–30 %), отжима, сушки и термофиксации при температурах 130 и 220 °С в течение 15 и 2 мин соответственно. Гидролизную обработку (стирку) огнезащищенных образцов проводили в растворе моющего средства (5 г/л, 40 °С) с последующим полосканием в холодной воде. Перед и после гидролизной обработки определяли остаточное содержание антипирена на образце.

Огневые испытания образцов огнезащитной полиэфирной ткани проводили в соответствии с СТБ 11.03.02.–2010 (п. 6.6.7)¹: в течение 5 с образец ткани поджигали с помощью газовой горелки, расположенной под углом 60 °С к его нижней кромке. Образец считали выдержавшим огневые испытания, если после отнятия пламени время его самостоятельного горения не превышало 5 с, одновременно фиксировали случаи прогорания до одной из кромок, образования горящих капель, среднюю длину обугленной части на образце.

Дисперсность растворов ОЗС исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе марки LEO 906E. Образцы для ПЭМ-исследования препарировали прямым методом нанесения раствора ОЗС на коллодиевую пленку-подложку. Рентгенофазовый анализ ОЗС в виде порошков проводили на дифрактометре ДРОН-2 (CuK_α - излучение). Идентификацию кристаллических фаз проводили с использованием программного обеспечения ICDD [17]. Комплексный термический анализ (ДСК, ТГ) исходных и огнезащитных образцов ткани проводили с использованием прибора Netzsch STA 449C Jupiter со скоростью нагрева 10 °С/мин в атмосфере азот/кислород (80/20) в интервале температур 30–600 °С. Суммарное тепловыделение ($\Sigma Q_{\text{экзо}}$, Дж/г) исследуемых образцов определяли при обработке соответствующих кривых ДСК по площади комплексных пиков экзотермических эффектов с помощью программного приложения к прибору.

Результаты исследования и их обсуждение. На первой стадии исследования по приданию полиэфирной ткани огнестойких свойств проводили синтез N-P-Me-содержащих (где Me – Ca, Sn, Al, Zn) огнезащитных составов и изучали их агрегативную устойчивость в зависимости от рецептурного состава металлофосфатной связки, природы нейтрализующих, модифицирующих агентов и кислотности среды (pH). В таблице 1 представлен химический состав нескольких серий (А–Д) синтезированных продуктов в виде молярного соотношения основных компонентов ОЗС в пересчете на оксиды или гидриды.

Составы серии А (табл. 1, ОЗС-1А – ОЗС-9А) получены на основе связки Са-Ф. Из данных таблицы 1 следует, что для большинства продуктов синтеза характерна кислотность с pH 0–1. Установлено, что увеличение содержания нейтрализующих агентов (NaHCO_3 индивидуально или в смеси с KHCO_3) с одновременным увеличением показателя кислотности до pH 3–5 приводило к образованию расслаивающихся суспензий вместо растворов и выпадению нерастворимого аморфного осадка фосфатов кальция. Безрезультатной была попытка перевести образующиеся нерастворимые формы соединений кальция в раствор с помощью комплексообразователя Na-ЭДТА (ОЗС-4А). Введением в составы на заключительной стадии синтеза модифицирующих добавок – медиативного агента (коллоидного раствора SnCl_2 в растворе HCl или изопропанол (ИПС; 2-метилэтанол)) и/или водорастворимого полимера (5 %-й раствор полиакриламида – ПАА) в готовые ОЗС-5А – ОЗС-9А были получены составы в виде растворов, но с показателями кислотности не выше pH 0–3. Модифицирующую добавку SnCl_2 вводили на основании литературных данных о том, что промежуточный (медиативный) слой оловосодержащих коллоидных частиц при обработке нетканых полиэфирных материалов способствовал хемосорбции антипиренов, а также об использовании соединений олова индивидуально или в смеси с другими добавками в качестве протравы перед крашением шерсти, шелка и хлопка [18; 19]. Раствор ПАА, являющийся полимерным электролитом, при невысоких концентрациях может служить стабилизатором коллоидосодержащих растворов [20] и одновременно может обладать адгезионными свойствами к волокнистым и тканым материалам благодаря способности макромолекул образовывать в концентрированных растворах ассоциаты коллоидных размеров [21]. Предполагалось, что благодаря физико-химическим свойствам модификаторов может быть снижена вымываемость антипиренов после стирки обработанной ими ткани и сохранится эффективность огнезащитной отделки.

¹ Система стандартов пожарной безопасности средства огнезащитные общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02.–2010. – Введ. 01.07.2011. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2010. – 20 с.

Продукты синтеза серии Б (ОЗС-1Б – ОЗС-4Б) получены на основе олово-фосфатной связки (Sn-Ф). В качестве нейтрализующих агентов в их синтезе использовали раствор аммиака индивидуально или в смеси с NaHCO_3 . На стадии нейтрализации в ОЗС в качестве модификаторов добавляли растворы ПАА и/или силиката натрия (жидкого стекла (ЖС)). ЖС, используемое ранее [22] в синтезе огнезащитных составов для целлюлозосодержащих и древесных материалов в качестве загущающего и диспергирующего агента, в синтезе ОЗС серии Б применяли для регулирования агрегативной устойчивости продуктов синтеза и усиления их адсорбционной способности к полиэфирной ткани. Одновременно ЖС являлось дополнительным щелочным нейтрализующим агентом, снижающим pH раствора. Из составов серии Б в виде устойчивого прозрачного раствора получен ОЗС-1Б с pH 1. Составы с более высоким pH представляли собой суспензии.

Составы серии В (ОЗС-1В – ОЗС-4В) получены на основе связки Ca, Sn-Ф, нейтрализованной раствором NaHCO_3 . В качестве модифицирующих агентов использовали ПАА и различные амины (ГМТА, КМ, диэтилентетрамин (ДЭТА)) индивидуально или в смеси (ГМТА + КМ), которые одновременно служили нейтрализующими агентами. Применение аминов в синтезе ОЗС обосновывалось их способностью к образованию в растворе комплексных соединений с фосфатами, которые в условиях температурного воздействия образуют на поверхности защищаемого материала термоизолирующий слой вспененных продуктов, тем самым снижая горючесть подложки [23; 24]. Введение ГМТА, КМ или ДЭТА совместно с ПАА (ОЗС-2В – ОЗС-4В) позволило снизить кислотность ОЗС до pH 2–5, при этом составы представляли собой суспензии. При pH 1 в присутствии модификаторов ПАА, ГМТА и КМ продукт синтеза (ОЗС-1В) только в свежесинтезированном виде представлял собой прозрачный раствор, который в течение 24 ч в результате старения превращался в густую суспензию. Из составов серии В в виде раствора для обработки тканых полиэфирных образцов для последующих огневых испытаний отобран свежесинтезированный ОЗС-1В.

ОЗС серии Г получены на основе связки Al, Zn, Sn-Ф (ОЗС-1Г – ОЗС-4Г). На стадии нейтрализации в реакционную смесь вводили растворы аммиака (ОЗС-1Г), KHCO_3 или KOH (ОЗС-2Г, ОЗС-3Г) или смесь растворов аммиака и KOH (ОЗС-4Г). Заменой в рецептурах ОЗС исходного реагента оксида кальция на гидроксиды алюминия и цинка предполагалось увеличение термостойкости огнезащитной отделки ткани, поскольку известно [10], что термодеструкция аммонийных алюмо- и цинкфосфатов, составляющих основу ОЗС серии Г, протекает в более высокотемпературном интервале по сравнению с дигидрофосфатом кальция, присутствующим в кальций-содержащих ОЗС. В виде растворов с pH 1 получен ОЗС-1Г, а также свежесинтезированные ОЗС-2Г и ОЗС-3Г, которые подвергались быстрому старению и имели вид плотных суспензий. Увеличение содержания нейтрализатора или одновременное введение в связку растворов аммиака и щелочи (ОЗС-4Г) приводило к получению продуктов синтеза исключительно в виде суспензии.

Составы серии Д получены нейтрализацией связки Ba-Ф аммиаком (ОЗС-1Д, ОЗС-2Д). Так как известно [25], что растворы некоторых солей бария (например, ацетата) используются как протрава перед крашением тканей для лучшего удерживания красителя на них, то было высказано предположение, что Ba-фосфатные ОЗС по сравнению с Ca-фосфатными смогут активнее удерживаться на полиэфирном волокне. В качестве исходного Ba-содержащего реагента использовали насыщенный раствор хлорида бария, т.к. в лабораторной практике для синтеза фосфатов бария обычно используют растворимые соли бария [26]. Из-за большего размера катиона Ba^{2+} по сравнению с другими щелочноземельными катионами (Mg^{2+} и Ca^{2+}) в растворе фосфорной кислоты не образуются устойчивые барий-фосфатные комплексы, поэтому даже в избытке ортофосфат-ионов при повышении pH от 0 до 5 происходит осаждение нерастворимых фосфатов бария [27]. Поэтому для удерживания ионов Ba^{2+} в качестве модификаторов в ОЗС на стадии нейтрализации добавляли «уротропиновую смесь» – раствор ГМТА с NH_4Cl [26]. Одновременно «уротропиновая смесь» являлась также

и нейтрализующим агентом. В качестве дополнительного модифицирующего агента вводили ПАА. Установлено, что синтез ОЗС в виде прозрачного раствора в данных условиях возможен только при pH 0. При повышении pH до 5 получали суспензии, которые в течение короткого промежутка времени расслаивались.

В результате синтезов ОЗС на основе металлофосфатных связок в виде прозрачных растворов получены ОЗС-1А, ОЗС-8А, ОЗС-9А, ОЗС-1Б, ОЗС-1В, ОЗС-1Г, ОЗС-1Д, которые отобраны для дальнейших испытаний эффективности огнезащитной отделки тканей после гидролизной обработки (табл. 2). Установлено, что после стирки огнезащищенных тканых образцов содержание антипирена на них резко снижалось: остаточное содержание ОЗС составляло от 0,1 до 0,8 %, что в 14–30 раз меньше, чем до стирки.

Таблица 2. – Результаты огневых испытаний огнезащищенной полиэфирной ткани после гидролизной обработки

Обозначение ОЗС	Привес ОЗС до стирки (после стирки), %	Время самостоятельного горения, с	Высота прогоревшей части, мм	Примечания ¹		
				Г, ГКр	К	СЗ
ОЗС-1А	9,1 (0,45)	23	Г	Г	К	–
ОЗС-8А	19,6 (0,40)	1,5	64	–	–	СЗ
ОЗС-9А	20,5 (0,30)	0	66	–	–	СЗ
ОЗС-1Б	22,9 (0,40)	1	97	–	К	–
ОЗС-1В	41,3 (0,82)	15	Г	Г	К	–
ОЗС-1Г	34,5 (0,11)	21	108	ГКр	К	–
ОЗС-1Д	14,6 (0,43)	21	90	ГКр	К	–

Примечание. ¹ Исходная полиэфирная ткань сгорает полностью. Обозначения: Г или ГКр – образец сгорает полностью или догорает до кромки; К – горящие капли; СЗ – самозатухание; «–» – отсутствие Г, ГКр, К или СЗ.

Из всех испытанных ОЗС следует выделить ОЗС-8А и ОЗС-9А – образцы первой серии на основе Са-фосфатной связки, модифицированные ПАА и/или коллоидным раствором $SnCl_2$. В их присутствии после стирки сохранялась эффективность огнезащитной отделки полиэфирной ткани: время самостоятельного горения образцов не превышало 5 с, а высота прогоревшей части была не более 150 мм, при этом наблюдалось самозатухание материала и отсутствовали горящие капли.

Для остальных образцов полиэфирного тканого материала, огнезащищенных ОЗС на основе других металлофосфатных связок, после стирки характерно образование горящих капель и/или длительное самостоятельное горение (кроме ОЗС-1Б), доходящее до кромки, или полное их сгорание.

Для изучения влияния модифицирующих добавок на дисперсность ОЗС проведено сравнительное электронно-микроскопическое исследование размеров частиц дисперсной фазы ОЗС-1А и модифицированных ОЗС-8А и ОЗС-9А, полученных на основе одной и той же Са-фосфатной связки, но проявляющих различную огнезащитную эффективность (рис. 1). Предварительно рентгенографически установлено, что в качестве основной кристаллической фазы все эти составы содержат $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$.

По данным ПЭМ-исследования в растворах всех ОЗС (рис. 1) установлено наличие частиц коллоидных размеров (10–50 нм). Необходимо отметить, что размер частиц модифицированных ОЗС (рис. 1 б, в) значительно меньше по сравнению с ОЗС-1А: средний диаметр частиц ОЗС-8А составлял 10–20 нм (рис. 1б), мелкодисперсные агломерированные в кластеры частицы ОЗС-9А (рис. 1в) по размеру не превышают 10 нм, тогда как в растворе ОЗС-1А диаметр основной массы частиц и их агломератов составляет около 30–50 нм. То есть использование в синтезе ОЗС-8А и ОЗС-9А, более эффективных по сравнению с ОЗС-1А, таких модификаторов, как диспергирующий водорастворимый полимер ПАА индивидуально или совместно с медиативным агентом (водным коллоидным раствором $SnCl_2$) способствовало формированию более мелких частиц в их растворах.

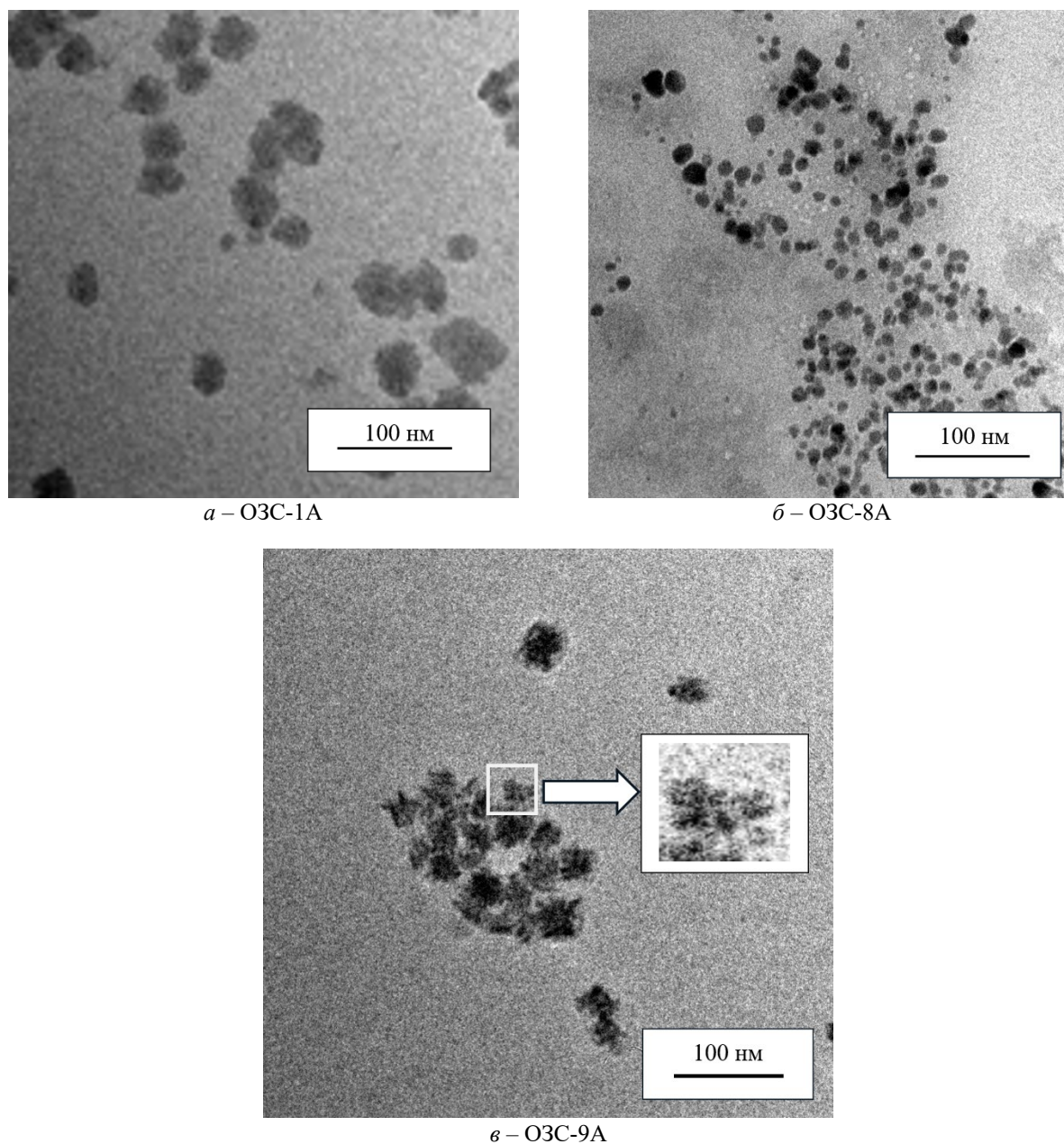
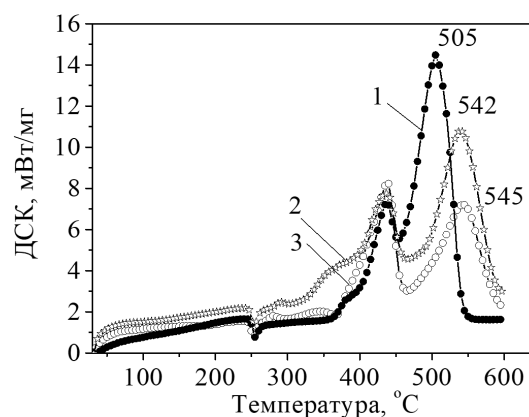


Рисунок 1. – Микрофотографии ПЭМ ($\times 2000$) частиц дисперсной фазы растворов ОЗС

Комплексным термическим анализом (ДСК, ТГ) на примере образцов ткани, обработанной ОЗС-9А, показано (рис. 2, табл. 3), что огнезащитная отделка образцов полиэфирной ткани как до гидролизной обработки, так и после нее при термодеструкции приводит к снижению скорости тепловыделения в высокотемпературной области ($450\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$), о чем свидетельствует уменьшение интенсивности соответствующих экзопиков при 545 и $542\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Одновременно можно судить об усилении термостойких свойств огнезащищенных образцов, поскольку наблюдается смещение этих же экзопиков в область более высоких температур по сравнению с исходной тканью.



1 – исходная полиэфирная ткань;
2 и 3 – огнезащищенная ОЗС-9А ткань
после гидролизной обработки и без нее
Рисунок 2. – Данные ДСК образцов ткани

Таблица 3. – Результаты комплексного термического анализа образцов исходной и огнезащитной полиэфирной ткани до и после гидролизной обработки (стирки)

Образец	ДСК		ТГ	
	$\Sigma Q_{\text{экзо}}$, Дж/г	T_{max} , °C	Δm_{max} , % (интервал температур, °C)	$\Delta m_{\text{общ}}$, %
Полиэфирная ткань	5626	437 505	81,9 (360–470) 16,3 (470–555)	98,2
Полиэфирная ткань + ОЗС-9А (после гидролизной обработки)	5109	437 542	79 (320–485) 15,5 (485–599)	94,5
Полиэфирная ткань + ОЗС-9А	3748	438 545	76,1 (310–476) 13,6 (476–599)	89,7

Необходимо отметить, что для стиранных и нестиранных огнезащитных образцов снижается суммарное тепловыделение ($\Sigma Q_{\text{экзо}}$) по сравнению с исходной полиэфирной тканью, не подвергавшейся огнезащитной отделке (табл. 3). Для огнезащитных образцов характерны также более низкие термогравиметрические характеристики – общая ($\Delta m_{\text{общ}}$) и пиковые потери массы (Δm_{max}).

Заключение

Для придания огнезащитной отделки, устойчивой к гидролизной обработке, полиэфирному тканевому материалу низкой поверхностной плотности (65 г/м^2) проведены синтезы ОЗС на основе металлофосфатных концентрированных растворов (связок) с использованием нейтрализующих агентов и модифицирующих добавок.

Установлены природа и молярные соотношения компонентов металлофосфатных ОЗС (Me – Ca, Sn, Al, Zn или Ba), концентрация нейтрализующих агентов (NaHCO_3 или $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и модификаторов (ПАА, SnCl_2 , ГМТА, NH_4Cl), применяемых индивидуально или в смеси, позволяющих получить устойчивое агрегатное состояние продуктов синтеза в виде растворов.

В ходе огневых испытаний выявлено, что после гидролизной обработки эффективность огнезащитной отделки сохранялась на образцах ткани, обработанных составами на основе Са-фосфатной связки, содержащих диспергирующую и/или медиативную модифицирующие добавки (ПАА и/или водный коллоидный раствор SnCl_2).

Прочное закрепление на тканевом материале замедлителей горения обусловлено наличием в эффективных ОЗС с добавлением отобранных модификаторов наиболее мелких частиц в нанодиапазоне (10–20 нм), что показано ПЭМ-исследованием дисперсности растворов ОЗС.

Вследствие лучшей привязки ОЗС на полиэфирном тканевом материале обеспечивалось достижение стойкого к гидролизной обработке огнезащитного эффекта, что подтверждено данными комплексного термического анализа. При этом наблюдалось снижение суммарного тепловыделения, уменьшение интенсивности экзотермических пиков со сдвигом их максимумов в более высокотемпературную область, а также уменьшение пиковой и общей потерь массы стиранных огнезащитных образцов по сравнению с исходной тканью.

Экспериментальные данные могут быть использованы для придания устойчивой к гидролизной обработке огнезащитной отделки полиэфирным тканевым материалам низкой плотности. Полученные результаты позволяют определить пути регулирования эффективности известных и разрабатываемых новых фосфатных огнезамедлительных систем для устойчивой к стиркам огнезащитной отделки полиэфирных тканей.

Работа финансируется в рамках задания № 2.1.07.01 Государственной программы научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», 2021–2025 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таусарова, Б.Р. Снижение горючести текстильных материалов: достижения и перспективы / Б.Р. Таусарова, А.Ж. Кутжанова, Г.С. Канлыбаева // Химический журнал Казахстана. – 2015. – № 1. – С. 287–303.
2. Перепелкин, К.Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности / К.Е. Перепелкин // Российский химический журнал. – 2002. – Т. 46, № 1. – С. 31–48. – URL: <https://www.chem.msu.su/rus/jvho/2002-1/31.pdf> (дата обращения: 26.09.2024).
3. Salmeia, K.A. Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry / K.A. Salmeia, S. Gaan, G. Malucelli // Polymers. – 2016. – Vol. 8, № 9. – Article 319. – 36 p. – DOI: 10.3390/polym8090319.
4. Alongi, J. A comparative analysis of nanoparticle adsorption as fire-protection approach for fabrics / J. Alongi, J. Tata, F. Carosio [et al.] // Polymers. – 2015. – Vol. 7, № 1. – P. 47–68. – DOI: 10.3390/polym7010047.
5. Киселев, А.М. Экологические аспекты процессов отделки текстильных материалов / А.М. Киселев // Российский химический журнал. – 2002. – Т. 46, № 1. – С. 20–30. – URL: <https://www.chem.msu.su/rus/jvho/2002-1/20.pdf> (дата обращения: 26.09.2024).
6. Константинова, Н.И. Особенности выбора огнезащитных составов для текстильных материалов / Н.И. Константинова, Т.Ю. Еремина, Е.А. Николаева, М.М. Альменбаев // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 9. – С. 17–25. – DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.17-25. – EDN: PBOPMR.
7. Сафонов, В.В. Химическая технология в искусстве текстиля / В.В. Сафонов, А.Е. Третьякова, В.М. Пыrkova [и др.]; под общ. ред. В.В. Сафонова – М.: ИНФРА-М, 2020. – 351 с. – URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=354195> (дата обращения: 26.09.2024).
8. Зубкова, Н.С. Снижение горючести текстильных материалов – решение экологических и социально-экономических проблем / Н.С. Зубкова, Ю.С. Антонов // Российский химический журнал. – 2002. – Т. 46, № 1. – С. 96–102. – URL: <https://www.chem.msu.su/rus/jvho/2002-1/96.pdf> (дата обращения: 26.09.2024).
9. Özer, M.S. Recent developments in phosphorus based flame retardant coatings for textiles: Synthesis, applications and performance / M.S. Özer, S. Gaan // Progress in Organic Coatings. – 2022. – Vol. 171. – Article 107027. – DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107027.
10. Богданова, В.В. Синтез и физико-химические свойства фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония (обзор) / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87, № 10. – С. 1385–1399. – EDN: MONTMI.
11. Богданова, В.В. Факторы, оказывающие доминирующее влияние на прекращение горения природных и синтетических материалов / В.В. Богданова, О.И. Кобец, М.М. Тихонов // Полимерные материалы пониженной горючести: материалы IX Междунар. конф. памяти академика Б.А. Жубанова, Алматы, 5–10 июня 2017 г. – Алматы: Казахский нац. ун-т им. аль-Фараби, 2017. – С. 88–91.
12. Рева, О.В. Зависимость эффективности огнезащиты нетканого полиэфирного материала от химической природы азот-фосфорсодержащего антипирена / О.В. Рева, В.В. Богданова, А.С. Лукьянов [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. – 2017. – № 2. – С. 85–93. – URL: <https://journals.bsu.by/index.php/chemistry/article/view/1171>. – EDN: YQUZDX.
13. Рева, О.В. Синтез и исследование огнезащитных свойств новых металлофосфатных замедлителей горения для текстильных материалов, используемых в защитной одежде / О.В. Рева, В.В. Богданова, З.В. Шукело [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 4. – С. 402–417. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-4.402. – EDN: PMCJNB.
14. Богданова, В.В. Огнезадерживающие свойства металлофосфатных суспензий на основе природного сырья / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. науч. тр. / Ин-т химии новых матер НАН Беларуси. – Минск: Беларуская навука, 2011. – С. 272–284.
15. Богданова, В.В. Регулирование физико-химических свойств композиций на основе фосфатов металлов-аммония, проявляющих огнезащитный и огнетушащий эффект / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Свиридовские чтения: сб. ст. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – Вып. 7. – С. 21–27. – URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/24996> (дата обращения: 26.09.2024).

16. Malucelli, G. Sol-gel technique for protective textile and clothing / G. Malucelli // *Advances in Functional and Protective Textiles* / Ed.: S. ul-Islam, B.S. Butola. – Kidlington: Woodhead Publishing (Elsevier), 2020. – Chapter 1. – P. 1–17. – DOI: 10.1016/B978-0-12-820257-9.00001-1.
17. Powder diffraction file. Data Cards. ICPDS / Int. Centre for diffraction data. – Swarthmore, Pennsylvania, USA, 1989.
18. Рева, О.В. Химическая прививка огнезащитных композиций к полиэфирным матрицам / О.В. Рева, В.В. Богданова, З.В. Шукело // *Свиридовские чтения: сб. ст.* – Минск: Изд. центр БГУ, 2013. – Вып. 9. – С. 158–168. – URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/228375> (дата обращения: 26.09.2024).
19. Елкина, А.К. Крашение дублировочных материалов естественными органическими и кубовыми красителями / А.К. Елкина // *Художественное наследие: хранение, исследование, реставрация.* – 1980. – № 6 (36). – С. 96–111. – URL: <https://www.gosniir.ru/library/artistic-heritage/artistic-heritage-06.aspx> (дата обращения: 26.09.2024).
20. Воробьева, Е.В. Полимерные комплексы в водных и солевых средах / Е.В. Воробьева, Н.П. Крутько. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 175 с. – ISBN: 978-985-08-1179-0.
21. Громаков, Н.С. Дисперсные системы и их свойства: учебное пособие по коллоидной химии / Н.С. Громаков. – Казань: Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2015. – 91 с. – ISBN 978-5-7829-0515-6.
22. Богданова, В.В. Атмосферостойкий огнезащитно-огнетушащий состав для предотвращения и тушения пожаров в природном комплексе / В.В. Богданова, О.И. Кобец // *Свиридовские чтения: сб. ст.* – Минск: Изд. центр БГУ, 2017. – Вып. 13. – С. 31–40. – URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/194667> (дата обращения: 26.09.2024).
23. Жуманиязов, М.Ж. Политерма растворимости тройной системы гексаметилентетрамин-мономмонийфосфат-вода / М.Ж. Жуманиязов, Б.М. Беглов, О.Ф. Ходжаев, Н.Х. Юлдашев // *Журнал общей химии.* – 2004. – Т. 74, № 7. – С. 1085–1088. – EDN: PCRLEZ.
24. Dreyfors, J.M. Hexamethylenetetramine: a review / J.M. Dreyfors, S.B. Jones, Y. Sayed // *American Industrial Hygiene Association Journal.* – 1989. – Vol. 50, Iss. 11. – P. 579–585. – DOI: 10.1080/15298668991375191.
25. Ахметов, Т.Г. Химия и технология соединений бария / Т.Г. Ахметов. – М.: Химия, 1974. – 152 с.
26. Фрумина, Н.С. Аналитическая химия бария: монография / Н.С. Фрумина, Н.Н. Горюнова, С.Н. Еременко. – М: Наука, 1977. – 200 с.
27. Судакас, Л.Г. Фосфатные вяжущие системы: монография / Л.Г. Судакас. – СПб.: Квинтет, 2008. – 254 с. – ISBN 978-5-902983-04-0.

**Влияние рецептурного состава металлофосфатных огнезамедлительных систем
и модифицирующих добавок на устойчивость огнезащитной отделки
полиэфирных тканей к гидролизной обработке**

**Influence of the formulation of metal phosphate fire-retardant systems
and modifying additives on the resistance of fire-retardant finishing
of polyester fabrics to hydrolysis treatment**

Богданова Валентина Владимировна

доктор химических наук, профессор

Учреждение Белорусского государственного
университета «Научно-исследовательский
институт физико-химических проблем»,
лаборатория огнетушащих материалов,
заведующий лабораторией

Адрес: ул. Ленинградская, 14,
220006, г. Минск, Беларусь

Email: bogdanova@bsu.by

SPIN-код: 5367-7201

Valentina V. Bogdanova

Grand PhD in Chemical Sciences, Professor

Research Institute for Physical Chemical
Problems of the Belarusian State University,
Laboratory of Fire Extinguishing Materials,
Head of the Laboratory

Address: Leningradskaya str., 14,
220006, Minsk, Belarus

Email: bogdanova@bsu.by

ORCID: 0000-0002-8557-9925

Кобец Ольга Игоревна

кандидат химических наук

Учреждение Белорусского государственного
университета «Научно-исследовательский
институт физико-химических проблем»,
лаборатория огнетушащих материалов,
ведущий научный сотрудник

Адрес: ул. Ленинградская, 14,
220006, г. Минск, Беларусь

Email: kobetsoi@mail.ru

SPIN-код: 7365-1743

Olga I. Kobets

PhD in Chemical Sciences

Research Institute for Physical Chemical
Problems of the Belarusian State University,
Laboratory of Fire Extinguishing Materials,
Leading Researcher

Address: Leningradskaya str., 14,
220006, Minsk, Belarus

Email: kobetsoi@mail.ru

ORCID: 0000-0002-6702-7430

Рева Ольга Владимировна

кандидат химических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
химической, биологической, радиационной
и ядерной защиты, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Email: volha107@rambler.ru

SPIN-код: 9028-4876

Olga V. Reva

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological, Radiation
and Nuclear Protection, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Email: volha107@rambler.ru

ORCID: 0000-0003-4006-8678

INFLUENCE OF THE FORMULATION OF METAL PHOSPHATE FIRE-RETARDANT SYSTEMS AND MODIFYING ADDITIVES ON THE RESISTANCE OF FIRE-RETARDANT FINISHING OF POLYESTER FABRICS TO HYDROLYSIS TREATMENT

Bogdanova V.V., Kobets O.I., Reva O.V.

Purpose. Development of a formulation of metal phosphate flame retardant systems in the form of stable colloid-containing solutions, as well as a study of the effect of modifying additives on the resistance of fire-retardant finishing of polyester fabrics to hydrolysis treatment (washing).

Methods. Sol-gel method for synthesis of metal phosphate flame retardant systems, laboratory and standard methods of fire-retardant finishing, hydrolysis treatment and fire testing of polyester woven samples, transmission electron microscopy, complex thermal analysis (differential scanning calorimetry – DSC, thermogravimetry – TG).

Findings. The sol-gel method was used to obtain fire retardant systems (FRS) based on metal phosphate acidic concentrated solutions (binders). The synthesis conditions have been determined: the nature and ratios of the main components of Me-phosphate binders (Me – Ca, Sn, Al, Zn or Ba), the concentration of neutralizing agents (NaHCO_3 or $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) and modifiers (polyacrylamide, colloidal solution of SnCl_2 , hexamethylenetetramine, NH_4Cl , urea), and the acidity of the medium, which make it possible to obtain FRS in the form of aggregation-stable solutions. It has been shown that the achievement of a fire-protective effect resistant to hydrolysis treatment is due to the strong fixation of fire retardants based on the Ca-phosphate binder in the presence of selected modifying additives – dispersing and/or mediating (PAA and/or aqueous colloidal solution of SnCl_2) on the fabric. The presence of nanodispersed (10–20 nm) calcium and tin compounds in their solutions promote to better fixation of effective modified FRS. The resistance of the fire-retardant finish to hydrolysis treatment is confirmed by DSC and TG data: for fabric fire-protected with a modified composition (both after hydrolysis treatment and without it), the total heat emission is reduced (up to 1.5 times) with a simultaneous reduction in the total loss of mass of the samples compared to the original polyester material.

Application field of research. The experimental data can be used to impart a hydrolysis-resistant fire-retardant finish to low-density polyester woven materials. The results obtained make it possible to determine the ways of regulating the efficiency of known and new phosphate fire-retardant systems being developed for washing-resistant fire-retardant finishing of polyester fabrics.

Keywords: metal phosphate fire retardant systems, modifying additives, polyester woven material, fire retardant finishing, hydrolysis treatment.

(The date of submitting: October 1, 2024)

REFERENCES

1. Tausarova, B.R., Kutzhanova A.Zh., Kanlybaeva G.S. Snizhenie goryuchesti tekstil'nykh materialov: dostizheniya i perspektivy [Reducing the flammability of textile materials: achievements and prospects]. *Chemical Journal of Kazakhstan*, 2015. No. 1. Pp. 287–303. (rus)
2. Perepelkin K.E. Sovremennye khimicheskie volokna i perspektivy ikh primeneniya v tekstil'noy promyshlennosti [Modern chemical fibers and prospects for their application in the textile industry]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2002. Vol. 46, No. 1. Pp. 31–48. (rus). URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2002-1/31.pdf> (date of access: September 26, 2024).
3. Salmeia K.A., Gaan S., Malucelli G. Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry. *Polymers*, 2016. Vol. 8, № 9. Article 319. 36 p. DOI: 10.3390/polym8090319.
4. Alongi J., Tata J., Carosio F., Rosace G., Frache A., Camino G. A comparative analysis of nanoparticle adsorption as fire-protection approach for fabrics. *Polymers*, 2015. Vol. 7, № 1. P. 47–68. DOI: 10.3390/polym7010047.
5. Kiselev A.M. Ekologicheskie aspekty protsessov otdelki tekstil'nykh materialov [Ecological aspects of textile finishing processes]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2002. Vol. 46, No. 1. Pp. 20–30. (rus). URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2002-1/20.pdf> (date of access: September 26, 2024).
6. Konstantinova, N.I., Eremina T.Yu., Nikolaeva E.A., Al'menbaev M.M. Osobennosti vybora ognезashchitnykh sostavov dlya tekstil'nykh materialov [Special aspects of fire retardant composition selection

- for textile materials]. *Fire and Explosion Safety*, 2018. Vol. 27. No. 9. Pp. 17–25. (rus). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.17-25. EDN: PBOPMR.
7. Safonov V.V., Tret'yakova A.E., Pyrkova V.M., Men'shova I.I., Pankratova E.V. *Khimicheskaya tekhnologiya v iskusstve tekstilya* [Chemical technology in the art of textiles]. Moscow: INFRA-M, 2020. 351 p. (rus). URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=354195> (date of access: September 26, 2024).
8. Zubkova N. S. Antonov Yu.S. Snizhenie goryuchesti tekstil'nykh materialov – reshenie ekolo-gicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh problem [Reducing the flammability of textile materials – solving environmental and socio-economic problems]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2002. Vol. 46, No. 1. Pp. 96–102. (rus). URL: <https://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2002-1/96.pdf> (date of access: September 26, 2024).
9. Özer M.S., Gaan S. Recent developments in phosphorus based flame retardant coatings for textiles: Synthesis, applications and performance. *Progress in Organic Coatings*, 2022. Vol. 171. Article 107027. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107027.
10. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis and physicochemical properties of Di- and trivalent metal–ammonium phosphates. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014. Vol. 87, No. 10. Pp. 1387–1401. (rus). DOI: 10.1134/S1070427214100012. EDN: UVBEXF.
11. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Tikhonov M.M. Faktory, okazyvayushchie dominiruyushchee vliyanie na prekrashchenie goreniya prirodnikh i sinteticheskikh materialov [Factors that have a dominant influence on the cessation of combustion of natural and synthetic materials]. *Proc. of IX Intern. conf. in memory of Academician B.A. Zhubanov «Polimernye materialy ponizhennoy goryuchesti* [Polymeric materials of reduced flammability]», Almaty, June 5–10, 2017. Almaty: Al-Farabi Kazakh National University, 2017. Pp. 88–91. (rus)
12. Reva, O.V., Bogdanova V.V., Luk'yanov A.S., Perevoznikov S.S., Andreeva T.N. Zavisimost' effektivnosti ognezashchity netkanogo poliefirnogo materiala ot khimicheskoy prirody azot-fosfor-soderzhashchego antipirena [Dependence of fire proof efficiency of nonwoven polyester material from the chemical nature of nitrogen and phosphorus-containing flame retardant]. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2017. No. 2. Pp. 85–93. (rus). URL: <https://journals.bsu.by/index.php/chemistry/article/view/1171>. EDN: YQUZDX.
13. Reva O.V., Bogdanova V.V., Shukelo Z.V., Nazarovich A.N., Kobets O.I. Sintez i issledovanie ognezashchitnykh svoystv novykh metallofosfatnykh zamedliteley goreniya dlya tekstil'nykh materialov, ispol'zuemykh v zashchitnoy odezhde [Synthesis and study of flame retardant properties of new metal phosphate flame retardants for textile materials used in protective clothing]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 4. Pp. 402–417. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-4.402. EDN: PMCJNB.
14. Bogdanova, V.V., Kobets O.I. Ognezaderzhivayushchie svoystva metallofosfatnykh suspenziy na osnove prirodnogo syr'ya [Fire-retardant properties of metal phosphate suspensions based on natural raw materials]. *Khimicheskie reaktivы, reagenty i protsessы malotonnazhnoy khimii* [Chemical reagents, reagents and processes of low-tonnage chemistry]: proceedings of the Insitut of Chemistry of New Matter of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk: Belaruskaya navuka, 2011. Pp. 272–284. (rus)
15. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Regulirovanie fiziko-khimicheskikh svoystv kompozitsiy na osnove fosfatov metallov-ammoniya, proyavlyayushchikh ognezashchitnyy i ogetushashchiy effect [Regulation of the physicochemical properties of compositions based on metal-ammonium phosphates exhibiting a fire retardant and fire extinguishing effect]. *Sviridov readings: collected papers*. Minsk: Belarusian State University, 2011. Iss. 7. Pp. 21–27. (rus). Url: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/24996> (date of access: September 26, 2024).
16. Malucelli G. Sol-gel technique for protective textile and clothing. Chapter 1 in book: *Advances in Functional and Protective Textiles*. Ed. by S. Islam, B.S. Butola. Kidlington: Woodhead Publishing (Elsevier), 2020. P. 1–17. DOI: 10.1016/B978-0-12-820257-9.00001-1.
17. *Powder diffraction file. Data Cards. ICPDS*. Int. Centre for diffraction data. Swarthmore, Pennsylvania, USA, 1989.
18. Reva, O.V., Bogdanova V.V., Shukelo Z.V. Khimicheskaya privivka ognezashchitnykh kompozitsiy k poliefirnym matritsam [Chemical grafting of flame retardant compositions to polyester matrices]. *Sviridov readings: collected papers*. Minsk: Belarusian State University, 2013. Vol. 9. Pp. 158–168. (rus). URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/228375> (date of access: September 26, 2024).
19. Elkina A.K. Krashenie dublirovочnykh materialov estestvennymi organicheskimi i kubovymi krasitelyami [Dyeing of duplicating materials with natural organic and cube dyes]. *Khudozhestvennoe nasledie: khranenie, issledovanie, restavratsiya*, 1980. No. 6 (36). Pp. 96–111. (rus). URL: <https://www.gosniir.ru/library/artistic-heritage/artistic-heritage-06.aspx> (date of access: September 26, 2024).
20. Vorob'eva E.V., Krut'ko N.P. *Polimernye komplekсы v vodnykh i solevykh sredakh* [Polymer complexes in aqueous and salt media]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2010. 175 p. (rus). ISBN 978-985-08-1179-0.

21. Gromakov N.S. *Dispersnye sistemy i ikh svoystva* [Dispersed systems and their properties]: colloidal chemistry textbook. Kazan: Kazan State University of Architecture and Engineering, 2015. 91 p. (rus). ISBN 978-5-7829-0515-6.
22. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Atmosferostoykiy ogneshchitno-ognetushashchiy sostav dlya predotvrashcheniya i tusheniya pozharov v prirodnom komplekse [Weatherproof fire retardant-extinguishing chemical agent for the prevention and suppression of fires in the natural complex]. *Sviridov readings: collected papers*. Minsk: Belarusian State University, 2017. Vol. 13. Pp. 31–40. (rus). URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/194667> (date of access: September 26, 2024).
23. Zhumaniyazov M.Zh., Beglov B.M., Khodzhaev O.F., Yuldashev N.Kh. Solubility polytherm of the ternary system hexamethylenetetramine-ammonium dihydrogen phosphate-water. *Russian Journal of General Chemistry*, 2004. Vol. 74, Iss. 7. Pp. 1001–1004. DOI: 10.1023/B:RUGC.0000045855.52134.25. EDN: XMTCL.
24. Dreyfous J.M., Jones S.B., Sayed Y. Hexamethylenetetramine: a review. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1989. Vol. 50, Iss. 11. Pp. 579–585. DOI:10.1080/15298668991375191.
25. Akhmetov T.G. *Khimiya i tekhnologiya soedineniy bariya* [Chemistry and technology of barium compounds]. Moscow: Khimiya, 1974. 152 p. (rus)
26. Frumina N.S., Goryunova N.N., Eremenko S.N. *Analiticheskaya khimiya bariya* [Analytical chemistry of barium]: monograph. Moscow: Nauka, 1977. 200 p. (rus)
27. Sudakas L.G. *Fosfatnye vyazhushchie sistemy* [Phosphate binder systems]: monograph. Saint Petersburg: Kvintet, 2008. 254 p. (rus). ISBN 978-5-902983-04-0.

Copyright © 2024 Bogdanova V.V., Kobets O.I., Reva O.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСТЕКАНИЯ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ ОГНЕТУШАЩИХ СОСТАВОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОРЮЧЕЙ ЖИДКОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ ИХ КОМПОНЕНТОВ

Иванов И.Ю., Навроцкий О.Д., Лихоманов А.О., Журов М.М.

Цель. Разработка регрессионной модели с помощью метода полного факторного эксперимента для исследования влияния массовой доли компонентов в растворе водного пленкообразующего огнетушащего состава на коэффициент растекания водной пленки по поверхности горючей жидкости и проведение оптимизации содержания компонентов состава для получения максимального коэффициента растекания.

Методы. В работе применены эмпирические методы исследования (измерение поверхностного и межфазного натяжения растворов), метод рандомизации и полного факторного эксперимента для получения регрессионной модели, а также модуль «Профили желательности» программного пакета STATISTICA. Определение поверхностного и межфазного натяжений растворов поверхностно-активных веществ в водных системах проводили методом отрыва кольца Дю Нуи на автоматическом тензиометре KRÜSS - K20.

Результаты. Представлены результаты полного факторного эксперимента, на основании которого получена регрессионная модель, описывающая изменение значения коэффициента растекания водной пленки пленкообразующих огнетушащих составов по поверхности горючей жидкости в зависимости от соотношения их компонентов. В ходе анализа полного факторного эксперимента определены значимые и незначимые факторы, а также проведено ранжирование значимых факторов по степени их влияния на коэффициент растекания водного пленкообразующего огнетушащего состава по поверхности горючей жидкости. Проведена оптимизация процентного соотношения компонентов состава для получения коэффициента растекания со значением 3,3 мН/м.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рецептуры пленкообразующих огнетушащих составов для тушения пожаров.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, поверхностное натяжение, межфазное натяжение, полный факторный эксперимент, регрессионная модель, пенообразователь.

(Поступила в редакцию 11 октября 2024 г.)

Введение

Огнетушащая эффективность пленкообразующих огнетушащих составов зависит от ряда параметров, таких как коэффициент растекания пленкообразующего раствора по поверхности горючей жидкости, время жизни водной пленки на поверхности горючей жидкости, кратность и устойчивость образуемой пены и т.д. [1–4].

Водный раствор поверхностно-активных веществ растекается по поверхности горючей жидкости при условии, что сумма значений поверхностного натяжения водного раствора на границе с воздухом и межфазного поверхностного натяжения будет меньше поверхностного натяжения горючей жидкости. Для снижения поверхностного натяжения до необходимых величин в составе пленкообразующего раствора применяют фторированные ПАВ (далее – ФПАВ), для снижения межфазного натяжения углеводородные ПАВ (далее – УПАВ).

Для описания способности пленкообразующих огнетушащих составов растекаться по поверхности горючей жидкости (далее – ГЖ) используют коэффициент растекания, который рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{раст}} = \sigma_{\text{п.н}}^{\text{г.ж}} - (\sigma_{\text{п.н}}^{\text{р.п}} + \sigma_{\text{м/ф.ж}}^{\text{р.п}}), \quad (1)$$

где $\sigma_{п.н}^{г.ж}$ – поверхностное натяжение горючей жидкости, Н·м⁻¹;

$\sigma_{п.н}^{р.п}$ – поверхностное натяжение раствора пенообразователя, Н·м⁻¹;

$\sigma_{м/ф.ж}^{р.п}$ – межфазное натяжение между раствором пенообразователя и горючей жидкостью, Н·м⁻¹.

В соответствии с требованиями национального стандарта¹, предъявляющего технические требования к пенообразователям для тушения пожаров, поверхностное натяжение рабочего раствора пленкообразующих составов должно быть не более 17,5 мН/м, а величина межфазного натяжения рабочего раствора на границе с гептаном – не менее 1,5 мН/м. С учетом того что значения поверхностного натяжения наиболее распространенных пленкообразующих пенообразователей находятся в диапазоне от 15,5 до 17,5 мН/м, а межфазного натяжения в диапазоне от 1,5 до 3,0 мН/м, величина коэффициента растекания может быть от 0 до 3,5 мН/м.

Анализ результатов экспериментальных работ различных авторов по исследованию взаимосвязи поверхностной активности раствора пенообразователя и его огнетушащей эффективности подтверждают определяющую роль коэффициента растекания по поверхности горючей жидкости: чем больше величина коэффициента растекания, тем эффективнее пена тушит нефтепродукт [2; 3].

Таким образом, нахождение значений коэффициента растекания в зависимости от соотношения компонентов ПАВ различной природы при разработке рецептур пленкообразующих пенообразователей является первостепенной задачей. Для установления рабочих концентраций компонентов водного пленкообразующего огнетушащего состава ранее были проведены серии разведывательных экспериментов по установлению поверхностного и межфазного натяжений подходящих по свойствам растворов ПАВ [5; 6]. С целью исследования влияния количества каждого компонента в растворе на коэффициент растекания применен метод полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ). Данный метод позволяет существенно сократить количество экспериментов (наблюдений) для понимания природы исследуемого процесса. ПФЭ широко применяется для изучения влияния определенных факторов на исследуемый процесс и поиск их оптимальных значений, при которых этот процесс протекает требуемым образом [7].

Основная часть

Экспериментальное определение поверхностного и межфазного натяжений водных растворов огнетушащих составов проводилось с помощью автоматического тензиометра KRÜSS - K20. В качестве горючей жидкости применялся эталонный н-гептан с поверхностным натяжением ($\sigma_{п.н}^{г.ж}$), равным 20,5 Н·м⁻¹.

На основе анализа проведенных разведывательных экспериментов по изучению поверхностного и межфазного натяжений было принято решение о проведении полного факторного эксперимента (ПФЭ). В качестве независимых переменных уравнения регрессии были выбраны три главных фактора: массовые доли ФПАВ (X_1), неионогенного (X_2) и анионного (X_3) УПАВ со значениями $X_1 = 1; 2$ и 3 мас.%, $X_2 = 0,5; 1$ и $1,5$ мас.%, $X_3 = 0; 1,5$ и 3 мас.% соответственно. В качестве зависимой переменной уравнения регрессии был принят один отклик – коэффициент растекания ($K_{раст}$). ПФЭ проводился на трех уровнях для каждого из трех факторов сериями из пяти экспериментов, что составило 27 серий опытов (табл. 1). Поскольку зависимость коэффициента растекания от данных факторов не является линейной, для адекватного описания и анализа результатов экспериментов требуется как минимум три уровня. Каждый из этих опытов позволяет получить средние значения коэффициента расте-

¹ Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Взамен СТБ ГОСТ Р 50588-99; введ. 12.08.2016. – Минск, Госстандарт, 2016. – 42 с.

кания, которые затем могут быть использованы для выявления закономерностей и оптимизации значений $K_{\text{раст}}$. Для обеспечения достоверности результатов и исключения влияния систематических ошибок, которые могут возникнуть из-за внешних условий, порядок проведения серий экспериментов был определен случайным образом. Каждая серия из пяти экспериментов с определенной конфигурацией факторов проводилась в случайном порядке, что позволяет снизить вероятность искажения данных, вызванного изменениями в окружающей среде (температуры, влажности) или в результате внесения исследователем (человеческий фактор). Важность такого подхода к экспериментам заключается не только в получении точных данных, но и в возможности их дальнейшей интерпретации. С помощью анализа полученных данных можно выявить, как именно каждый из факторов влияет на $K_{\text{раст}}$.

Таблица 1. – План ПФЭ и его результаты

№	Значение фактора			Поверхностное натяжение, мН/м	Межфазное натяжение, мН/м	$K_{\text{раст}}$, мН/м	№	Значение фактора			Поверхностное натяжение, мН/м	Межфазное натяжение, мН/м	$K_{\text{раст}}$, мН/м
	X_1	X_2	X_3					X_1	X_2	X_3			
2.	1	0,5	1,5	15,27	2,63	2,6	10.	2	0,5	0	15,89	2,83	1,78
14.	2	1	1,5	15,42	2,1	2,98	22.	3	1	0	15,46	2,35	2,69
12.	2	0,5	3	15,3	2,76	2,44	21.	3	0,5	3	14,81	2,98	2,71
6.	1	1	3	16,42	1,01	3,07	1.	1	0,5	0	15,74	2,62	2,14
11.	2	0,5	1,5	15,31	2,91	2,28	23.	3	1	1,5	15,94	2,12	2,44
8.	1	1,5	1,5	15,91	1,34	3,25	17.	2	1,5	1,5	15,71	1,71	3,08
7.	1	1,5	0	16,22	1,16	3,12	4.	1	1	0	15,99	1,84	2,67
20.	3	0,5	1,5	15,71	2,97	1,82	25.	3	1,5	0	16,01	2,46	2,03
9.	1	1,5	3	15,91	1,35	3,24	27.	3	1,5	3	15,72	1,77	3,01
3.	1	0,5	3	15,36	2,35	2,79	19.	3	0,5	0	15,86	3,08	1,56
26.	3	1,5	1,5	15,72	1,79	2,99	18.	2	1,5	3	15,69	1,65	3,16
16.	2	1,5	0	15,98	1,48	3,04	15.	2	1	3	15,56	2,2	2,74
5.	1	1	1,5	15,72	1,49	3,29	24.	3	1	3	15,44	2,39	2,67
13.	2	1	0	15,62	2,04	2,84							

Для избежания допущения ошибок в расчетах и иллюстративного представления полученных данных анализ ПФЭ осуществлялся с помощью программного пакета для статистического анализа STATISTICA (компания StatSoft, Inc., США), которая является одним из ведущих программных продуктов для обработки и анализа данных в различных сферах деятельности от научных лабораторий и технических университетов до финансовых учреждений и государственных организаций [7].

На основании результатов ПФЭ возможно построение регрессионных моделей трех типов: без учета взаимодействия факторов, с учетом взаимодействий главных факторов 2-го порядка, с учетом взаимодействий главных факторов и квадратов главных факторов 2-го порядка. Кроме того, в каждую из вышеуказанных моделей могут включаться факторы, возведенные во вторую степень. Выбор типа модели осуществлялся по коэффициенту детерминации R^2 , который показывает долю изменяемости отклика, происходящую при одновременном воздействии всех включенных в модель факторов. Чем больше значение данного коэффициента ($0 \leq R^2 \leq 1$), тем выше качество модели (точность описания взаимосвязи между факторами и откликом по результатам экспериментов). Так, для модели первого типа коэффициент детерминации оказался равным $R^2 \approx 0,79$, для модели второго типа – $R^2 \approx 0,82$ и для модели третьего типа – $R^2 \approx 0,91$. Несмотря на высокое значение коэффициента детерминации для модели третьего типа, анализ уровня статистической значимости главных факторов не позволяет подтвердить с достаточной степенью уверенности их влияние на отклик, ввиду

чего для анализа принята модель второго типа с учетом взаимодействий главных факторов 2-го порядка.

Модель второго типа с учетом взаимодействий главных факторов 2-го порядка в натуральном масштабе переменных будет выглядеть следующим образом:

$$K_{\text{раст}} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_3 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_2 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3, \quad (2)$$

где $b_0, b_1, \dots, b_9$ – коэффициенты уравнения регрессии в натуральном масштабе переменных. Данные коэффициенты имеют размерность, обратную размерности переменных (или произведению переменных) при них.

Перед построением самой регрессионной модели крайне важно убедиться в отсутствии мультиколлинеарности – сильной линейной зависимости между независимыми переменными. Мультиколлинеарность искажает оценки коэффициентов регрессии, затрудняет интерпретацию результатов и делает невозможным достоверное определение вклада каждого фактора в изменение отклика. Для выявления мультиколлинеарности был рассчитан матричный коэффициент корреляции Пирсона, результаты которого были сведены в корреляционную матрицу. Анализ этой матрицы показал, что ни один из коэффициентов корреляции между независимыми переменными не превысил по модулю значения 0,75. Наиболее высокая корреляция между парой факторов составила 0,65. Это значение хотя и свидетельствует о наличии некоторой связи между факторами, не является критическим для регрессионного анализа и не указывает на значительную мультиколлинеарность. Таким образом, можно заключить, что использование построенной модели (2) для ранжирования факторов по степени их влияния на коэффициент растекания является обоснованным. Однако необходимо отметить, что наличие корреляции между факторами, даже не достигающей уровня мультиколлинеарности, может усложнять интерпретацию результатов. Сильная корреляция между независимыми переменными означает, что эти переменные частично отражают одну и ту же информацию, что может привести к неточному определению вклада каждой из них в зависимую переменную. Поэтому желательно оценить не только корреляцию между независимыми переменными, но и их влияние на $K_{\text{раст}}$, чтобы получить более полную картину. Анализ корреляционной матрицы позволил определить степень корреляции каждого фактора с коэффициентом растекания. Была обнаружена умеренная корреляционная связь (в диапазоне $0,25 < |r| \leq 0,75$) между откликом и факторами X_1 ($r = -0,41$), X_2 ($r = 0,65$) и X_3 ($r = 0,38$). Знак «-» перед коэффициентом корреляции указывает на обратную зависимость: увеличение значения фактора приводит к уменьшению $K_{\text{раст}}$ [8]. На основе полученных коэффициентов корреляции можно предварительно оценить влияние факторов на коэффициент растекания. Наиболее сильное влияние оказывает фактор X_2 ($r = 0,65$), затем X_1 ($r = -0,41$) и X_3 ($r = 0,38$). Однако эта оценка основана только на корреляционном анализе и не учитывает другие возможные факторы, которые могут влиять на $K_{\text{раст}}$. Для более точной оценки необходимо использовать результаты регрессионного анализа, которые позволяют учесть совместное влияние всех факторов и определить их вклад в модель с учетом возможных взаимодействий. Следует отметить, что выбор порога в 0,75 для определения мультиколлинеарности – это условное значение. В некоторых случаях может быть использован более строгий порог, например 0,8 или 0,9, в зависимости от специфики задачи и требований к точности оценки.

Для подтверждения результатов, полученных методом корреляционного анализа, и проверки статистической значимости выявленных связей было проведено исследование с помощью дисперсионного анализа ANOVA (от англ. Analysis of Variance), реализованного в статистическом пакете STATISTICA. Результаты этого анализа представлены в таблице 2. Дисперсионный анализ позволяет оценить влияние нескольких независимых переменных

(факторов) на одну зависимую переменную (отклик). В отличие от корреляционного анализа, который лишь показывает наличие связи между переменными, ANOVA позволяет установить, насколько значимо это влияние. Основная задача ANOVA заключается в разбиении общей дисперсии зависимой переменной на составляющие, объясняемые действием различных факторов, и остаточную дисперсию, обусловленную случайными ошибками.

Таблица 2. – Результаты дисперсионного анализа с учетом незначимых факторов и без их учета

Фактор (регрессор)	С учетом незначимых факторов		Без учета незначимых факторов	
	Сумма квадратов отклонений	Уровень статистической значимости, p	Сумма квадратов отклонений	Уровень статистической значимости, p
X_1	1,003472	0,000844	1,003472	0,000468
X_1^2	0,006446	0,749843	исключен	
X_2	2,568889	0,000006	2,568889	0,000001
X_2^2	0,259030	0,055661	0,259030	0,048874
X_3	0,871200	0,001536	0,871200	0,000926
X_3^2	0,057363	0,347248	исключен	
X_1X_2	0,001633	0,872346	исключен	
X_1X_3	0,073633	0,288684	исключен	
X_2X_3	0,128133	0,166696	исключен	
Ошибка ¹	1,043519	0,055661	1,310728	
Общая сумма квадратов отклонений	6,013319	–	6,013319	–

Примечание. ¹ Ошибка отражает ту часть изменчивости, которая не может быть объяснена факторами, участвующими в анализе, и показывает, насколько точны выводы и велика роль случайных факторов в полученных результатах.

Традиционно, если p -значение меньше 0,05, нулевая гипотеза (гипотеза об отсутствии влияния фактора) отвергается, и влияние фактора считается статистически значимым. Из анализа таблицы 2 к значимым факторам относятся X_1 , X_2 , X_3 . Это не означает автоматического подтверждения отсутствия влияния остальных регрессоров на отклик, а лишь свидетельствует о недостаточности данных для доказательства их влияния на выбранном уровне значимости. Кроме того, поскольку уровень статистической значимости X_2^2 незначительно отличается от $p = 0,05$, было принято решение данный фактор в модели оставить. Для более глубокого понимания стоит проанализировать размеры эффекта этого фактора, чтобы оценить практическую значимость наблюдаемых различий, даже если он статистически незначим: небольшое, но статистически значимое различие может быть практически несущественным, в то время как большое, но статистически незначимое различие может иметь важное практическое значение. После исключения незначимых факторов влияние фактора X_2^2 стало статистически значимым ($p = 0,048874$).

Исключение незначимых факторов преобразует рассматриваемую модель в следующий вид:

$$K_{\text{раст}} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_2^2 + b_4X_3. \quad (3)$$

Результаты дисперсионного анализа модели без учета незначимых факторов демонстрируют высокий коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,78$, что указывает на то, что уточненная модель достаточно точно описывает влияние независимых переменных (факторов X_1 , X_2 и X_3) на исследуемый отклик ($K_{\text{раст}}$). Это говорит о том, что около 78 % вариации в $K_{\text{раст}}$ может быть объяснено включенными в модель факторами. Остальные 22 % объясняются либо случайными ошибками, либо влиянием неучтенных переменных. Важно отметить, что сумма квадратов отклонений для каждого фактора пропорциональна его вкладу в объяснение дисперсии зависимой переменной и анализ сумм квадратов отклонений (ANOVA) для каждого фактора (табл. 2) позволяет оценить вклад каждого фактора в общую изменчивость

отклика. Согласно представленным данным наибольшее влияние на коэффициент растекания раствора оказывает фактор X_2 , объясняя приблизительно 42,7 % от общей суммы квадратов отклонений. Это существенно больше, чем вклад других факторов. После фактора X_2 по значимости идет фактор X_1 ($\approx 16,7$ %), а затем X_3 ($\approx 14,5$ %). Наличие X_2^2 ($\approx 4,3$ %) в уравнении регрессии свидетельствует о нелинейном характере влияния фактора X_2 . Низкое значение суммы квадратов отклонений для X_2^2 (менее 5 %) подтверждает гипотезу о второстепенном влиянии этого фактора на коэффициент растекания. Полученные результаты дисперсионного анализа согласуются с выводами корреляционного анализа, что говорит о внутренней согласованности результатов, полученных с помощью различных статистических методов.

Для определения количественного влияния различных факторов на коэффициент растекания был применен метод оценки эффектов. Величина эффекта ΔK показывает абсолютное изменение коэффициента растекания при изменении соответствующего фактора от минимального до максимального значения [7]. В таблице 3 представлены эффекты каждого фактора и свободного члена регрессионного уравнения, который отражает базовое значение коэффициента растекания при нулевых значениях всех факторов. Этот свободный член важен для построения полной модели и прогнозирования коэффициента растекания в различных условиях.

Таблица 3. – Результаты оценки эффектов факторов

Фактор (регрессор)	Эффект ΔK	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	Уровень значимости	Доверительный интервал	
					Нижнее знач.	Верхнее знач.
Свободный член	2,821111	0,081362	34,67341	0,000000	2,652376	2,989846
X_1	-0,472222	0,115064	-4,10400	0,000468	-0,710850	-0,233595
X_2	0,755556	0,115064	6,56641	0,000001	0,516928	0,994183
X_2^2	-0,415556	0,199296	-2,08511	0,048874	-0,828871	-0,002240
X_3	0,440000	0,115064	3,82397	0,000926	0,201372	0,678628

Анализ эффектов позволил ранжировать факторы по степени их влияния на коэффициент растекания. Самыми значимыми факторами, оказывающими наибольшее влияние на изменчивость коэффициента растекания, оказались, согласно дисперсионному анализу, X_2 , X_1 и X_3 , с оценками эффектов приблизительно 0,76, 0,47 и 0,44 соответственно. Это означает, что изменение фактора X_2 от минимального до максимального значения приводит к наибольшему изменению коэффициента растекания, затем идет фактор X_1 , а за ним следует фактор X_3 .

Таблица 3, помимо самих эффектов, содержит также важные статистические показатели, позволяющие оценить надежность полученных результатов. Стандартная ошибка характеризует точность оценки эффекта и показывает, насколько сильно могут колебаться полученные значения эффекта при повторном проведении эксперимента. Чем меньше стандартная ошибка, тем точнее оценка. Для проверки значимости эффектов использовались значения t -статистики Стьюдента. Значения уровня значимости $p < 0,05$ (вероятность ошибочно отклонить нулевую гипотезу о том, что эффект фактора равен нулю) свидетельствуют о статистически значимом влиянии фактора на коэффициент растекания. Приведен доверительный интервал для эффектов, в пределах которых с вероятностью 95 % находится истинный эффект фактора. Широкий доверительный интервал указывает на большую неопределенность оценки.

На основании проведенного анализа ПФЭ можно заключить, что на коэффициент растекания значимо влияют все главные факторы X_1 , X_2 , X_3 а также регрессор X_2^2 . Согласно оценке эффектов факторов (рис. 1) увеличение массовой доли факторов X_2 и X_3 приводит к повышению коэффициента растекания, а увеличение регрессоров X_1 и X_2^2 наоборот способствует снижению коэффициента растекания.

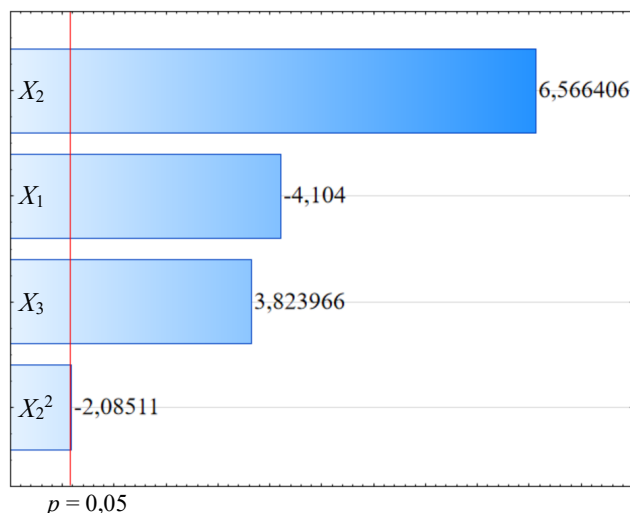


Рисунок 1. – Результаты оценки эффектов факторов

Далее выполнена оценка коэффициентов $b_0, b_1, \dots, b_4$, уравнения регрессии (3) результаты которой представлены в таблице 4. Численные значения коэффициентов имеют размерность, обратную размерности факторов (или произведению факторов) при них. Здесь следует отметить, что уровень статистической значимости для всех факторов оказался ниже 0,05, т.е. факторы, для которых следует считать верной гипотезу о равенстве нулю коэффициента при данном факторе и исключить его из модели, отсутствуют.

Таблица 4. – Оценка коэффициентов уравнения регрессии

Фактор	Коэффициент регрессии, b_i	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	Уровень значимости	Доверительный интервал	
					Нижнее знач.	Верхнее знач.
Свободный член	1,486667	0,377262	3,94068	0,000697	0,70427	2,269060
X_1	-0,236111	0,057532	-4,10400	0,000468	-0,35542	-0,116797
X_2	2,417778	0,805446	3,00179	0,006567	0,74738	4,088172
X_2^2	-0,831111	0,398593	-2,08511	0,048874	-1,65774	-0,004481
X_3	0,146667	0,038355	3,82397	0,000926	0,06712	0,226209

Конечный вид разработанной модели в натуральном масштабе переменных для прогнозирования коэффициента растекания следующий:

$$K_{\text{раст}} = 1,486667 - 0,236111X_1 + 2,417778X_2 - 0,831111X_2^2 + 0,146667X_3. \quad (4)$$

Подстановка всех возможных комбинаций факторов согласно плану ПФЭ в формулу (4) приводит к результатам, отличающимся от экспериментальных в среднем не более чем на 7,2 % (наибольшее отклонение 22,1 %).

Для подтверждения адекватности разработанной модели проведен анализ остатков. Под остатками подразумеваются разности между экспериментальными значениями отклика и их предсказанными значениями по модели.

В первую очередь остатки должны быть случайными величинами и не должны зависеть от предсказанных по модели значений зависимой переменной. Для проверки данного условия построена диаграмма рассеяния остатков в зависимости от предсказанных по модели значений зависимой переменной (рис. 2). Исходя из полученных результатов следует отметить, что систематической зависимости величины остатков от предсказанных значений отклика не наблюдается, следовательно, по данному критерию модель можно считать адекватной.

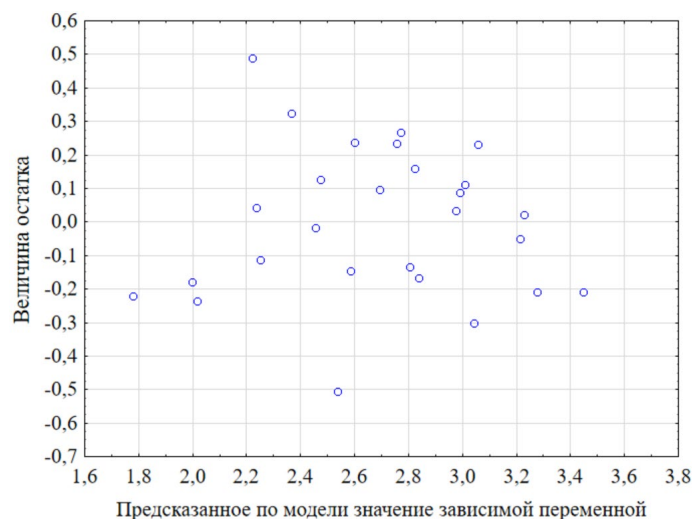


Рисунок 2. – Диаграмма рассеяния остатков

Еще одним критерием адекватности модели является распределение величин остатков. Остатки должны быть распределены нормально и иметь математическое ожидание, близкое к нулю. Для визуальной оценки нормальности распределения остатков в первую очередь можно воспользоваться гистограммой остатков (рис. 3) и вероятностным графиком остатков (рис. 4).

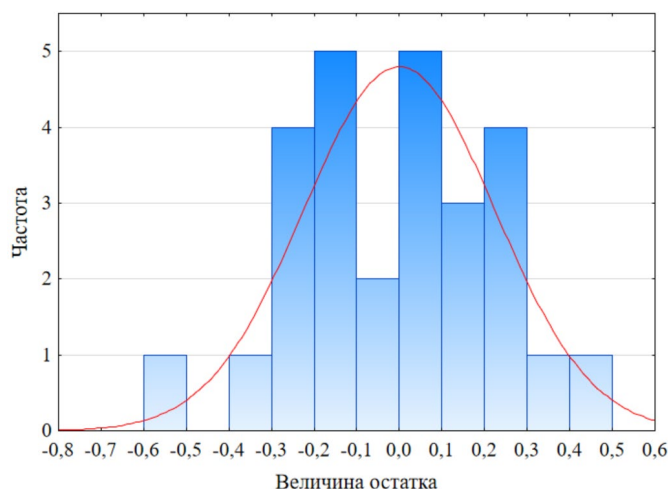


Рисунок 3. – Гистограмма распределения остатков

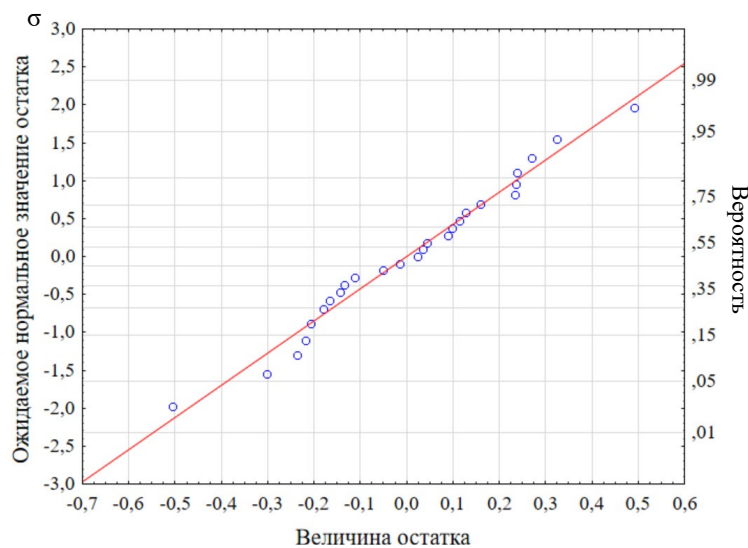


Рисунок 4. – Вероятностный график остатков

Таким образом, результаты проведенных анализов остатков показали адекватность построенной модели для прогнозирования значений зависимой переменной.

Оптимизация процентного соотношения компонентов состава водного пленкообразующего пенообразователя. Для анализа влияния факторов на значение отклика и поиска процентного соотношения компонентов состава, при которых значение коэффициента растекания будет составлять максимальное значение, применялся инструмент «Профили желательности» (Desirability Profiles) [9]. Профили желательности строятся на основе функции желательности, которая описывает взаимосвязь между предсказанными значениями зависимой переменной и их желательностью. Функция желательности позволяет выделить диапазоны значений, которые являются приемлемыми или предпочтительными для исследуемой переменной. Для построения этой функции необходимо определить три ключевые точки желательности. Первая точка соответствует наибольшей желательности, в нашем случае это максимальное значение зависимой переменной $K_{\text{раст}}$, равное 3,3 мН/м. Вторая точка – это наименьшая желательность, что соответствует минимальному значению $K_{\text{раст}}$, равному 1,56. Эта точка показывает, какие значения являются неприемлемыми или нежелательными. Третья точка – это среднее значение между первой и второй точками, которое составляет 2,42. Эта точка служит ориентиром для определения промежуточных значений, которые могут быть также полезны в процессе оптимизации. После задания исходных данных, модели (4) и трех точек желательности строится оптимальный профиль желательности, который в виде графика отображает, как изменения факторов могут повлиять на желаемую зависимую переменную (рис. 5).

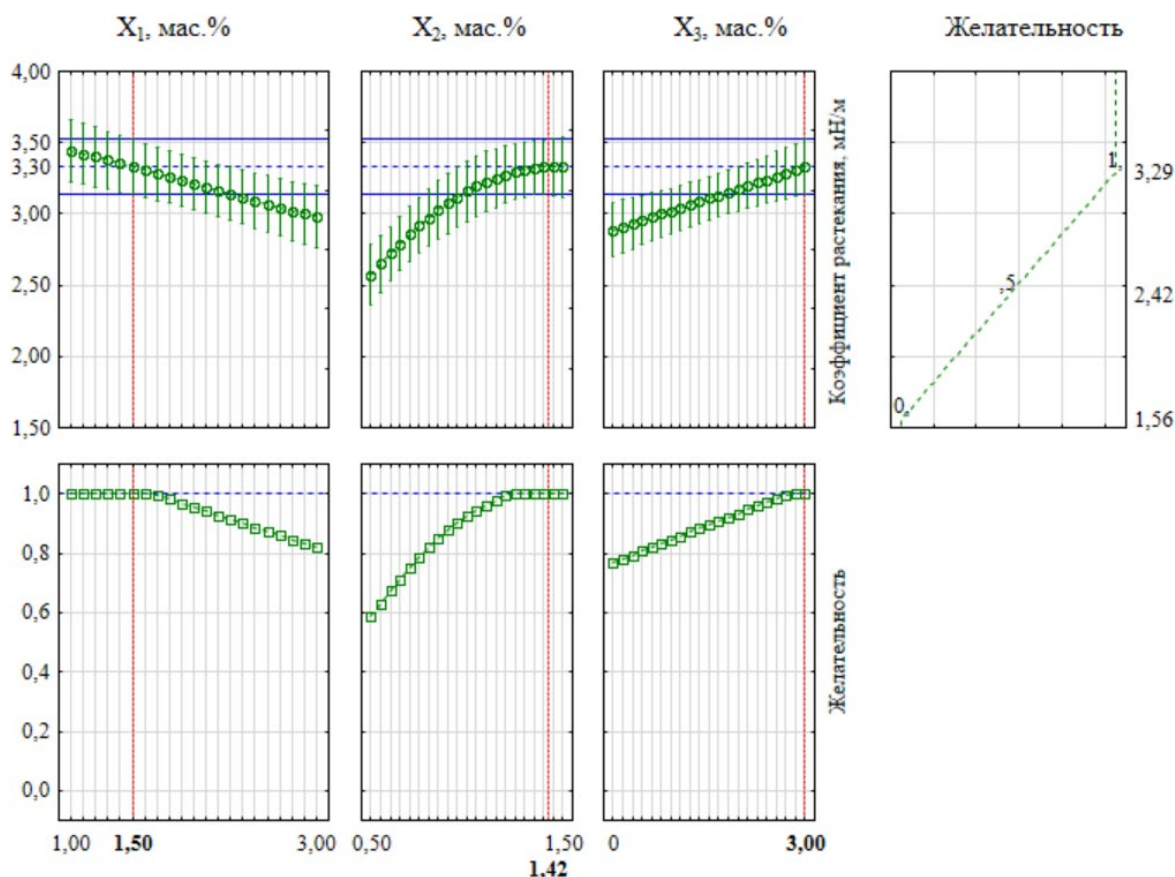


Рисунок 5. – Оптимальный профиль желательности

Графическое представление включает в себя два ряда графиков. Каждый график верхнего ряда отображает зависимость $K_{\text{раст}}$ от одной независимой переменной (X_1 , X_2 и X_3) при фиксированных оптимальных значениях двух других переменных. Это позволяет визуализировать влияние каждой из переменных изолированно, что крайне важно для понимания их

индивидуального вклада в общий результат. В нижнем ряду представлены графики зависимости функции желательности (критерий, отражающий близость к оптимальным значениям всех параметров одновременно) от каждой из независимых переменных. Функция желательности, как правило, нормализована к диапазону $[0; 1]$, где 1 соответствует оптимальному сочетанию факторов. Красные линии на этих графиках обозначают оптимальные значения каждой переменной (X_1 , X_2 , X_3), достигающие максимального значения функции желательности. Из анализа графиков можно сделать вывод, что для $K_{\text{раст}} = 3,3$ мН/м максимальный уровень желательности, равный 1, достигается при следующих значениях независимых переменных: $X_1 = 1,60$ мас.%; $X_2 = 1,41$ мас.%; $X_3 = 3,00$ мас.% (на графике указанные значения выделены жирным шрифтом). Независимая переменная X_1 , исходя из планомерного спада функции желательности, приняла свое оптимальное значение. Наибольшее значение функции желательности для независимой переменной X_2 определено однозначно и совпадает со значением ее экстремума. Наибольшее значение функции желательности для независимой переменной X_3 находится на границе диапазона его значений. В связи с этим необходимо дополнительно исследовать диапазоны значений анионного УПАВ $X_3 = 3\text{--}4$ мас.% [6].

Заключение

В ходе экспериментального исследования, проведенного методом ПФЭ, была разработана регрессионная модель, описывающая зависимость коэффициента растекания от мас.% трех ключевых компонентов: ФПАВ, неионогенного УПАВ и анионного УПАВ с низкой пенообразующей способностью. Адекватность модели была оценена с использованием коэффициента детерминации R^2 . Близкое к единице значение коэффициента детерминации (полученное значение составило 0,78) свидетельствует о достаточно высокой точности модели. Сравнение предсказанных моделью значений коэффициента растекания с экспериментальными данными показало незначительное расхождение, не превышающее в среднем 7,2 % (наибольшее отклонение 22,1 %), что подтверждает высокую предсказательную способность модели в заданном диапазоне концентраций компонентов состава.

Анализ структуры регрессионной модели позволил установить, что наиболее существенно на величину коэффициента растекания влияет фактор X_2 (массовая доля неионогенного УПАВ). Относительно меньший эффект на изменение коэффициента растекания оказывают факторы X_1 (массовая доля ФПАВ), X_3 (массовая доля анионного УПАВ) и X_2^2 . Увеличение массовой доли факторов X_2 и X_3 приводит к повышению коэффициента растекания, а регрессоры X_1 и X_2^2 отвечают за снижение коэффициента растекания.

Оптимизация процентного соотношения компонентов состава для коэффициента растекания $K_{\text{раст}} = 3,3$ мН/м позволило получить следующие оптимальные значения: количество ФПАВ $X_1 = 1,60$ мас.%, количество неионогенного УПАВ $X_2 = 1,42$ мас.% и количество анионного УПАВ $X_3 = 3,00$ мас.%. Регрессионная модель, а также результаты оптимизации процентного соотношения компонентов водного пленкообразующего огнетушащего состава подлежат практической проверке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T23M-061 «Пленкообразующий огнетушащий состав для автоматических установок пожаротушения водой и пеной на основе фторированных поверхностно-активных веществ»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шароварников, А.Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение / А.Ф. Шароварников, С.А. Шароварников. – М.: Пожнаука, 2005. – 335 с. – EDN UWCCSP.
2. Хиль, Е.И. Сравнительная огнетушащая эффективность углеводородных и фторсодержащих пенообразователей / Е.И. Хиль, М.И. Саутиев, А.Ф. Шароварников, Д.Л. Бастриков // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 2. – С. 71–75. – EDN: TSLNIF.

3. Корольченко, Д.А. Анализ огнетушащей эффективности пен низкой кратности, полученных из фторсодержащих и углеводородных пенообразователей / Д.А. Корольченко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 3. – С. 37–43. – DOI: 10.25257/FE.2016.3.37-43. – EDN: WVJATX.
4. Каттге, А. Влияние фторированного стабилизатора на огнетушащую эффективность пены / А. Каттге, Е.И. Хиль // Пожарная безопасность. – 2016. – № 3. – С. 89–93. – EDN WMZFLJ.
5. Иванов, И.Ю. Обзор основных характеристик пленкообразующих пенообразователей и способы их контроля / И.Ю. Иванов, Я.А. Кондакова, О.Д. Навроцкий // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Иваново, 14 октября 2021 г. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 41–47. – EDN: PATKDW.
6. Иванов, И.Ю. Исследование фторированных поверхностно-активных веществ для разработки пленкообразующего огнетушащего состава / И.Ю. Иванов, О.Д. Навроцкий, Я.А. Кондакова [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 415–428. – DOI 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. – EDN: DGPXST.
7. Халафян, А.А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA: учеб. пособие / А.А. Халафян. – М.: Либроком, 2013. – 384 с.
8. Соколовская, И.Ю. Полный факторный эксперимент: метод. указания / И.Ю. Соколовская. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 36 с.
9. Халафян, А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных: учеб. / А.А. Халафян. – 3-е изд. – М.: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.

**Регрессионная модель прогнозирования коэффициента растекания
пленкообразующих огнетушащих составов по поверхности горючей жидкости
от соотношения их компонентов**

**Regression model for predicting the effectiveness of flow of film-forming fire extinguishing
compositions over the surface of combustible liquid from the ratio of their components**

Иванов Игорь Юрьевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: igor.ivanovwork8@gmail.com
SPIN-код: 3880-5485

Igor Yu. Ivanov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: igor.ivanovwork8@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1072-2432

Навроцкий Олег Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com
SPIN-код: 4031-1141

Oleg D. Navrotskiy

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: Oleg.Navrotsky@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4137-2519

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: alexlikh20@gmail.com
SPIN-код: 1837-8150

Aleksey O. Likhomanov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: alexlikh20@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9374-1486
ScopusID: 57210911673

Журов Марк Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра химической,
биологической, радиационной и ядерной
защиты, начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: Zhurmark@mail.ru
SPIN-код: 8325-4796

Mark M. Zhurov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Chemical, Biological,
Radiation and Nuclear Protection,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: Zhurmark@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5228-7371

REGRESSION MODEL FOR PREDICTING THE EFFECTIVENESS OF FLOW OF FILM-FORMING FIRE EXTINGUISHING COMPOSITIONS OVER THE SURFACE OF COMBUSTIBLE LIQUID FROM THE RATIO OF THEIR COMPONENTS

Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Likhomanov A.O., Zhurov M.M.

Purpose. Development of a regression model using the full factorial experiment method to study the influence of the mass fraction of components in a solution of an aqueous film-forming fire extinguishing composition on the spreading coefficient of the aqueous film over the surface of a flammable liquid and optimizing the content of the composition components to obtain the maximum flow coefficient.

Methods. The work uses empirical research methods (measurement of surface and interfacial tension of solutions), the method of randomization and full factorial experiment to obtain a regression model, as well as the «Desirability Profiles» module of the STATISTICA software package. The determination of surface and interfacial tension of solutions of surfactants in water systems was made by the method of tearing off Du Nouy rings on an automatic tensiometer KRÜSS - K20.

Findings. The article presents the results of a complete factorial experiment, on the basis of which a regression model was obtained that describes the change in the value of the coefficient of flow of an aqueous film of film-forming fire extinguishing compositions on the surface of a flammable liquid depending on the ratio of their components. During the analysis of the complete factorial experiment, significant and insignificant factors were determined, and a ranking of significant factors was carried out according to the degree of their influence on the coefficient of flow of an aqueous film-forming fire extinguishing composition on the surface of a flammable liquid. The percentage ratio of the composition components was optimized to obtain a flow coefficient equal to 3.3 mN/m.

Application field of research. The obtained results can be used in developing the formulation of film-forming fire extinguishing compositions for extinguishing fires.

Keywords: surfactants, surface tension, interfacial tension, full factorial experiment, regression model, foaming agent.

(The date of submitting: October 11, 2024)

REFERENCES

1. Sharovarnikov A.F., Sharovarnikov S.A. *Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav, svoystva, primeneniye* [Foam concentrates and fire extinguishing foam, Structure, properties, application]. Moscow: Pozhnauka, 2005. 335 p. (rus). EDN: UWCCSP.
2. Hil' E.I., Sautiev M.I., Sharovarnikov A.F., Bastrikov D. L. Sravnitel'naya ognetyashchaya effektivnost' uglevodorodnykh i ftorsoderzhashchikh penoobrazovateley [Comparative extinguishing efficiency of hydrocarbon and fluorinated foaming agents]. *Fire and Explosion Safety*, 2015. Vol. 24, No. 2. Pp. 71–75. (rus). EDN: TSLNIF.
3. Korol'chenko D.A. Analiz ognetyashchey effektivnosti pen nizkoy kratnosti, poluchennykh iz ftorsoderzhashchikh i uglevodorodnykh penoobrazovateley [Analysis of extinguishing efficiency of low expansion foam produced from fluorine containing and hydrocarbonic foam compounds]. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2016. No. 3. Pp. 37–43. (rus). DOI: 10.25257/FE.2016.3.37-43. EDN: WVJATX.
4. Kattge A., Hil' E. I. Vliyanie ftorirovannogo stabilizatora na ognetyashchuyu effektivnost' peny [The influence of fluorinated stabilizer on extinguishing efficiency of the foam]. *Fire Safety*, 2016. No. 3. Pp. 89–93. (rus). EDN: WMZFLJ.
5. Ivanov I.Yu., Kondakova Ya.A., Navrotsky O.D. Obzor osnovnykh kharakteristik plenkoobrazuyushchikh penoobrazovateley i sposoby ikh kontrolya [Overview of the main characteristics of film forming foaming agents and methods of their control]. *Proc. of V Intern. scientific-practical conf. «Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii»*, Ivanovo, Oktober 14, 2021. Ivanovo: Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2021. Pp. 41–47. (rus). EDN: PATKDW.
6. Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Kondakova Ya.A., Krasavin V.E., Busel M.O. Issledovanie ftorirovannykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv dlya razrabotki plenkoobrazuyushchego ognetyashchego sostava [Research of fluorinated surfactants for the development of a film-forming fire extinguishing

- composition]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 4. Pp. 415–428. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.415. EDN: DGPXST.
7. Khalafyan A.A. *Promyshlennaya statistika: kontrol' kachestva, analiz protsessov, planirovanie eksperimentov v pakete STATISTICA* [Industrial statistics: quality control, process analysis, experiment design in STATISTICA]: tutorial. Moscow: Librokom, 2013. 384 p. (rus)
 8. Sokolovskaya I.Yu. *Polnyy faktornyy eksperiment* [Full factorial experiment]: methodological instructions. Novosibirsk: NGAVT, 2010. 36 p. (rus)
 9. Khalafyan A.A. *STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh* [STATISTICA 6. Statistical analysis of data]: textbook. Moscow: Binom-Press, 2007. 512 p. (rus)

Copyright © 2024 Ivanov I.Yu., Navrotsky O.D., Likhomanov A.O., Zhurov M.M.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ЭНТРОПИЙНЫЙ АНАЛИЗ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА: МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Крецу Р.М., Рыбаков А.В.

Цель. Данное исследование направлено на разработку и апробацию методики энтропийного анализа для оценки и прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера. В рамках работы рассматриваются теоретические основы энтропийного анализа, а также определяется ряд ключевых параметров и показателей, применяемых в данном методе. Одной из задач является проведение сравнительного анализа с традиционными методами оценки рисков и выявление преимуществ предложенной методики.

Методы. В исследовании использованы системный анализ, энтропийный подход к оценке рисков, вероятностно-частотный анализ, а также методы моделирования и прогнозирования. Энтропийный анализ, основанный на концепции измерения неопределенности и хаоса в сложных системах, позволяет более точно оценивать вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций и прогнозировать их развитие.

Результаты. Исследование демонстрирует, что энтропийный подход обладает рядом преимуществ перед традиционными методами, такими как большая гибкость и возможность учета множества различных факторов риска. Этот метод позволяет глубже понять механизмы возникновения техногенных катастроф и значительно повысить эффективность мероприятий по их предотвращению и ликвидации. В статье также представлены результаты применения методики на примере аварии на ТЭЦ-3 в Норильске, что подчеркивает ее практическую значимость.

Область применения исследований. Прогнозирование и предотвращение техногенных катастроф в различных отраслях промышленности, включая энергетику, транспорт и промышленное производство, является важной задачей, решаемой на основе полученных данных. Эти данные могут использоваться для оптимизации управления рисками, повышения безопасности и устойчивости техногенных систем, а также для разработки стандартных методик и обучения специалистов. Научно-практическая значимость исследования заключается в создании эффективного инструмента для оценки и управления рисками в условиях высокой неопределенности и сложности современных техногенных систем. Область применения результатов подчеркивает важность исследования для различных отраслей промышленности.

Ключевые слова: риск-менеджмент, энтропийный анализ, оценка рисков, техногенные катастрофы, методы моделирования, анализ неопределенности, управление кризисами, энергетическая безопасность, предупреждение аварий.

(Поступила в редакцию 1 октября 2024 г.)

Введение

Современное общество сталкивается с растущей сложностью и взаимосвязанностью техногенных систем, что значительно увеличивает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера. Такие ситуации могут привести к серьезным последствиям, включая человеческие жертвы, значительный материальный ущерб и долгосрочные экологические проблемы. В условиях активного развития промышленности, транспорта и энергетики вопрос обеспечения безопасности и устойчивости этих систем становится все более актуальным. Эффективное управление рисками ЧС требует современных подходов к их оценке и прогнозированию, что обуславливает необходимость поиска и применения новых методов анализа.

Энтропийный анализ представляет собой метод оценки и прогнозирования ЧС, основанный на концепции энтропии – меры неопределенности и хаоса в системе. Применение

энтропийного подхода позволяет более точно оценивать вероятность возникновения ЧС, выявлять ключевые факторы риска и прогнозировать развитие событий в условиях неопределенности. В отличие от традиционных методов энтропийный анализ предоставляет возможность комплексного и многопараметрического анализа сложных систем, что особенно важно в контексте техногенных катастроф. Это делает его ценным инструментом для разработки стратегий по предотвращению и ликвидации ЧС.

Целью данной статьи является разработка и апробация методики энтропийного анализа для оценки и прогнозирования ЧС техногенного характера. Для достижения этой цели в статье ставятся следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы энтропийного анализа и его применение в практике.
2. Определить основные параметры и показатели, используемые в энтропийном анализе ЧС.
3. Провести сравнительный анализ результатов энтропийного анализа с традиционными методами оценки рисков и определить его преимущества и недостатки.
4. Оценить практическую значимость предложенной методики для прогнозирования и предотвращения ЧС техногенного характера.

Предлагаемый подход позволит не только улучшить понимание механизмов возникновения и развития техногенных катастроф, но и повысить эффективность мероприятий по их предотвращению и ликвидации.

Основная часть

Теоретические основы энтропийного анализа. Понятие энтропии является фундаментальным понятием в теории информации и термодинамике, отражающим меру неопределенности или беспорядка в системе. В контексте системного анализа энтропия используется для оценки сложности и устойчивости различных процессов и систем. Она помогает количественно оценить степень хаотичности и определить, насколько система подвержена изменениям или разрушениям. Применительно к анализу ЧС техногенного характера энтропия позволяет оценить вероятность возникновения различных событий и степень их влияния на систему в целом.

Энтропийный подход находит широкое применение в самых различных областях знаний. В экологии [1] он используется для оценки биоразнообразия и устойчивости экосистем. В экономике [2] – для анализа рыночных процессов и прогнозирования экономических кризисов. В информатике [3] и теории связи энтропия служит для оценки эффективности кодирования и передачи данных. В области управления рисками и анализа ЧС техногенного характера энтропия помогает оценить вероятность возникновения аварий и их потенциальные последствия, что способствует разработке более эффективных стратегий предотвращения и ликвидации ЧС. В таблице 1 представлен сравнительный анализ двух подходов к оценке рисков ЧС техногенного характера: энтропийного подхода и вероятностно-частотной оценки рисков.

С точки зрения методологии энтропийный подход предлагает иной взгляд на оценку рисков, измеряя неопределенность в информационных потоках, в то время как вероятностно-частотная оценка ориентирована на анализ прошлых данных и вероятностей событий:

- энтропийный подход: оценка рисков основана на использовании теории информации, которая позволяет измерять степень неопределенности и неожиданности событий;
- вероятностно-частотная оценка рисков: основана на частоте и вероятности возникновения событий, с учетом исторических данных и статистики.

С позиции практического применения энтропийный подход может быть полезным там, где данных недостаточно для традиционной статистической оценки, а вероятностно-частотная оценка лучше подходит для анализа рисков на основе исторических данных, например, для анализа сценариев с низкой вероятностью возникновения и критическим уровнем ущерба для общества, государства и окружающей среды, выделим эту группу рисков

в рамках термина «критические риски» производственного предприятия. Иначе говоря, энтропийный подход имеет преимущество в оценке рисков при отсутствии полной информации при анализе критических рисков, тогда как вероятностно-частотная оценка более надежна в стабильных и предсказуемых условиях, но можно недооценивать новые и неожиданные риски, особенно в условиях быстро изменяющейся производственной среды. Однако энтропийная оценка может быть сложна для интерпретации и принятия решений из-за отсутствия теоретических и методических основ.

Таблица 1. – Сравнение методов оценки рисков ЧС: энтропийный подход и вероятностно-частотная оценка

Аспект	Энтропийный подход	Вероятностно-частотная оценка
Виды рисков	Включает несколько видов рисков (экологические, техногенные и т.д.)	В основном сосредоточена на физических и социальных рисках
Оценка вероятности	Процесс оценки вероятности исходов более сложен, требует детализации параметров	Оценка вероятности часто базируется на исторических данных и статистике
Учет последствий	При учете последствий учитывается их разнообразие и степень влияния на окружающую среду	Последствия оцениваются в контексте их частоты и влияния на социальные структуры
Гибкость и адаптация	Оценка рисков может требовать дополнительной настройки и адаптации методов	Включает множество случайных событий
Преимущества	Модель хорошо адаптирована для сложных ситуаций	Метод позволяет получать адекватные оценки в условиях малой вариабельности
Ограничения	Трудно учитывать абсолютно все факторы	Оценка технологических и экономических рисков, связанных с ЧС

В энтропийном анализе рисков ЧС категория «критический риск» играет ключевую роль, определяя наиболее разрушительные сценарии для системы. Оценка результативности защитных мер становится необходимой для минимизации этих рисков. Информационная значимость в данном контексте выступает как количественная мера, показывающая вклад каждой защитной меры в снижение общей неопределенности и повышение устойчивости системы к ЧС. Анализ информационной значимости позволяет выявить наиболее критические риски и эффективные методы их управления, обеспечивая адекватное распределение ресурсов и максимальную защиту системы. Таким образом, энтропийный анализ рисков ЧС, используя информационную значимость, способствует более точной и обоснованной оценке эффективности защитных мер и повышению уровня готовности к потенциальным угрозам.

Защитные меры условно можно представить в рамках пяти категорий с оценкой результативности защитных мер и остаточной вероятностью реализации опасности¹. В таблице 2 защитные меры классифицируются по категориям, которые отражают различные уровни и типы вмешательств для минимизации рисков и ущерба в случае техногенных аварий. Каждая категория имеет свои особенности и предполагает определенные меры, направленные на снижение вероятности и/или ущерба от ЧС:

I категория: исключение опасности – меры направлены на полное исключение опасного объекта или ситуации либо на снижение уровня опасного фактора до безопасного уровня;

II категория: конструктивные меры – меры, исключающие возможность реализации опасного фактора, учитывающие или не учитывающие возможность умышленных действий работников, третьих лиц;

III категория: информационные меры – включают использование ограждающих, предупреждающих или сигнальных средств;

IV категория: организационные меры – обучение и проверка владения безопасными методами работы, выполнение работ по наряду-допуску;

¹ Методы оценки и расчета профессиональных рисков работников железнодорожного транспорта: ГОСТ Р 12.0.011–2017. – Введ. 22.12.2017. – М.: Стандартинформ, 2018. – 39 с.

V категория: реагирующие меры – применение мер реагирования на факторы/опасности ЧС, реагирование по планам ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛАРН), планам ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС), применение средств индивидуальной защиты (СИЗ) и др.

Таблица 2. – Категории результативностей защитных мер

Категория	Защитная мера	Результативность защитной меры с учетом контроля	Остаточная вероятность реализации опасности, P
I	Исключение опасности (опасного объекта, ситуации или действия)	1,0	0
	Снижение уровня опасного фактора в источнике опасности до безопасного уровня	0,9–1,0	0–0,1
	Применение конструктивных мер, исключающих возможность реализации опасного фактора (включая возможность умышленных действий работника по преодолению защитной меры)	0,8–0,9	0,1–0,2
II	Применение конструктивных мер, исключающих возможность реализации опасного фактора (исключая возможность умышленных действий работника по преодолению защитной меры)	0,7–0,8	0,2–0,3
III	Применение ограждающих, предупреждающих (запрещающих) информационных или сигнальных средств	0,6–0,7	0,3–0,4
IV	Обучение и проверка владения работниками безопасными методами и приемами выполнения работ	0,5–0,6	0,4–0,5
	Выполнение работ по наряду-допуску	0,3–0,5	0,5–0,6
	Организационные меры: инструктаж, контроль, страховка	0,2–0,3	0,7–0,8
V	Применение мер реагирования: улавливающие сетки (от падения), применение СИЗ, планы ликвидации ЧС (ПЛАРН, ПЛАС и др.)	0,1–0,2	0,8–0,9
	Организация оказания первой помощи	0,1	0,9

Результативность защитных мер напрямую зависит от наличия систематического контроля за их состоянием и функционированием. При отсутствии такого контроля результативность каждой меры из таблицы 2 уменьшается в два раза. Это связано с тем, что без постоянного мониторинга и корректирующих действий невозможно своевременно выявлять отклонения в работе системы, что снижает общую результативность защитных мер. Важно также учитывать, что средства и методы контроля могут изменяться по мере появления новых предложений на рынке, и предприятиям необходимо регулярно мониторить и оценивать их, чтобы поддерживать актуальные и наиболее эффективные решения для каждой категории защитных мер. Результативность измеряется по шкале от 0 до 1, где более высокие значения означают более результативные меры.

Остаточная вероятность P – это вероятность реализации опасности после применения защитных мер. Она зависит от категории и типа защитной меры.

Применение метода к анализу аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК». 29 мая 2020 г. в районе Кайеркан г. Норильска на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» произошла разгерметизация резервуара хранения дизельного топлива, в результате которой 21,2 тыс. т топлива вытекли из резервуара, вышли за пределы обвалования, попали в котлован, на прилегающую территорию и в ручей Безымянный. Впоследствии через ручей Безымянный и р. Далдыкан разлив топлива достиг р. Амбарная, где были установлены защитные боновые ограждения. По иску Росприроднадзора суд взыскал с предприятия рекордные 146 млрд рублей. Применим методику энтропийно-информационного анализа данной аварии [4; 5].

В рамках данного исследования был произведен сбор данных из отчета о расследовании причин аварии на ТЭЦ-3. Основные выявленные факторы включают технические причины аварии, такие как разрушение свайного основания резервуара, организационные недостатки, выражающиеся в недостаточном контроле и проектных ошибках, а также влияние климатических условий, в частности, аномально высоких температур.

Следующим этапом является определение начальной энтропии системы, которая может быть выражена через вероятности различных отказов и их последствий. В контексте рассматриваемой аварии на ТЭЦ-3 ключевым событием, влияющим на энтропию системы, является разрушение свайного основания резервуара и последующий разлив дизельного топлива. Данный отказ служит исходной точкой для анализа, поскольку имеет наиболее серьезные последствия для системы. Начальная энтропия системы, таким образом, определяется как мера неопределенности, связанной с данным отказом.

$$H(X) = -\sum p(X) \log_2 p(X), \quad (1)$$

где $p(X)$ – вероятность различных состояний X системы:

вероятность разрушения резервуара (исходя из данных) $p(\text{разрушение}) = 0,00015$;

вероятность нормального состояния резервуара $p(\text{норма}) = 1 - p(\text{разрушение}) = 0,99985$;

$$H(\text{начальная}) = -(0,00015 \log_2 0,00015 + 0,99985 \log_2 0,99985) \approx 0,00212.$$

Далее была проведена оценка информационного вклада предложенных в отчете мер. На основании отчета о расследовании аварии были предложены различные меры, направленные на снижение риска повторения подобных событий. Каждая из этих мер имеет определенный информационный вклад, способствующий снижению неопределенности в системе. В качестве примера можно рассмотреть следующие мероприятия:

- проведение регулярных обследований фундаментов резервуаров: эта мера позволяет своевременно выявлять потенциальные угрозы для целостности резервуаров, что значительно снижает вероятность возникновения критических отказов;

- установка системы мониторинга состояния многолетнемерзлых пород: введение данной системы позволяет контролировать изменения в состоянии грунта, что важно для оценки влияния климатических условий на устойчивость фундаментов;

- введение системы управления целостностью первичной защитной оболочки резервуаров: данная мера обеспечивает постоянный контроль за состоянием защитной оболочки, что позволяет оперативно устранять выявленные дефекты.

На основании собранных данных был выполнен расчет изменения энтропии для каждой из предложенных мер. Например, установка системы мониторинга многолетнемерзлых пород существенно снижает неопределенность, связанную с воздействием климатических условий (изменений климатических условий) на фундамент резервуара, тем самым уменьшая энтропию системы и снижая вероятность возникновения аварии. Предположим, что установка системы мониторинга снижает вероятность разрушения резервуара до величины $p'(\text{разрушение}) = 0,00005$, тогда

$$H(\text{система мониторинга}) = -(0,00005 \log_2 0,00005 + 0,99995 \log_2 0,99995) \approx 0,00079,$$

а изменение энтропии будет равно

$$\Delta H = H(\text{начальная}) - H(\text{система мониторинга}) \approx 0,00212 - 0,00079 = 0,00133.$$

Результаты расчетов изменения энтропии позволили определить наиболее результативные и эффективные меры, которые могут быть приняты для минимизации риска повторения аварии. В данном случае наиболее целесообразными решениями являются установка систем мониторинга и проведение регулярных обследований, которые значительно уменьшают неопределенность и способствуют повышению безопасности эксплуатации резервуаров на ТЭЦ-3 АО «НТЭК».

Таким образом, установка системы мониторинга снижает энтропию на 0,00133, что соответствует значительному уменьшению неопределенности и рисков, связанных с разрушением резервуара.

Понятие информационной значимости. Информационная значимость позволяет определить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на вероятность аварии после введения мер. В данном контексте информационная значимость может служить руководством для приоритизации действий по снижению рисков.

Высокая значимость: указывает на критические факторы, требующие первоочередного внимания. Например, несмотря на снижение вероятности, фактор X_1 (несущая способность свай) все еще имеет высокую значимость, что может потребовать дальнейших исследований и технических решений.

Средняя и низкая значимость: факторы с такой значимостью указывают на зоны, где меры уже дали результаты, но поддержка и контроль все равно необходимы.

В зависимости от детализированного состава системы мониторинга и отнесения ее к определенной категории мер защиты (табл. 2) вероятность разрушения дополнительно может быть снижена за счет выбора более результативной меры.

Для создания математической модели аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» сначала кратко определим **ключевые факторы и риски**.

Событие: разгерметизация резервуара хранения дизельного топлива, в результате чего разлилось 212 тыс. т топлива. Часть топлива попала в грунт и водные объекты. Были установлены боновые заграждения, чтобы предотвратить дальнейшее распространение загрязнения.

Причины аварии:

1) технические:

– недостаточная несущая способность плитного ростверка основания и железобетонных свай;

– разрушение свай-стоек и монолитного основания, просадка под днищем резервуара;

2) организационные:

– недостатки в проектировании и строительстве, а именно неправильные эксцентриситеты, отсутствие поперечной арматуры, неполное заглубление свай;

– некачественный контроль за эксплуатацией сооружений;

3) климатические: влияние изменения климата на многолетнемерзлые породы, приводящее к проседанию свай.

Построение математической модели. Для анализа аварии воспользуемся методом энтропийно-информационного анализа:

1) *элементы системы:*

X_1 – несущая способность свайного основания;

X_2 – уровень проектирования и строительных работ;

X_3 – условия эксплуатации и мониторинга;

X_4 – климатические условия;

2) *вероятностные характеристики:*

$P(X_1)$ – вероятность разрушения свайного основания;

$P(X_2)$ – вероятность дефектов в проектировании;

$P(X_3)$ – вероятность отсутствия надлежащего контроля;

$P(X_4)$ – вероятность изменения климатических условий, влияющих на прочность;

3) *модель риска:* используем модель, в которой общая вероятность аварии $P(A)$ выражается через вероятности событий:

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(X_i)), \quad (2)$$

где $n = 4$ – количество факторов критического риска.

Для примера расчета зададим вероятности на основе данных расследования:

$P(X_1) = 0,7$ – высокая вероятность из-за недостаточной несущей способности;

$P(X_2) = 0,6$ – вероятность дефектов, выявленных в процессе анализа проектных решений;

$P(X_3) = 0,5$ – вероятность недостаточного мониторинга;

$P(X_4) = 0,4$ – вероятность влияния климатических условий.

Тогда вероятность аварии:

$$P(A) = 1 - (1 - 0,7)(1 - 0,6)(1 - 0,5)(1 - 0,4);$$

$$P(A) = 1 - 0,3 \cdot 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,6 = 1 - 0,036 = 0,964.$$

Вероятность аварии составляет 96,4 %, что подтверждает высокий риск инцидента при данных условиях.

Таблица 3. – Защитные меры

Категория	Мера	Описание
Технические меры	Усиление свайного основания	Установка дополнительных свай и усиление существующих конструкций
	Антикоррозийные покрытия	Использование материалов, устойчивых к климатическим изменениям
Организационные меры	Повышение квалификации персонала	Обучение сотрудников для лучшего понимания рисков и их предотвращения
	Регулярные проверки	Внедрение систематических инспекций и аудитов для оценки состояния объектов
Климатические меры	Мониторинг температуры грунта	Установка датчиков для контроля температуры и состояния мерзлоты
	Исследование климатических изменений	Оценка влияния климатических факторов на состояние сооружений
Системы безопасности	Боновые ограждения	Установка дополнительных барьеров для предотвращения распространения разливов
	План ликвидации аварий	Разработка и проведение учений по реагированию на аварийные ситуации

Обновим модель и расчеты с учетом результативности из таблицы, представленной в приложенном документе, нужно связать вероятности каждого фактора с результативностью мер, которые были предприняты для снижения этих вероятностей. В результате модель будет учитывать не только исходные вероятности факторов, но и эффективность применяемых мер.

Обновленная модель с учетом результативности, основные параметры и предположения:

1. *Факторы риска X_i :*

X_1 – несущая способность свайного основания;

X_2 – уровень проектирования и строительных работ;

X_3 – условия эксплуатации и мониторинга;

X_4 – климатические условия.

2. *Исходные вероятности $P_0(X_i)$* , полученные на основе начальных оценок вероятностей возникновения каждого фактора без учета мер.

3. *Результативность мер $R(X_i)$* – коэффициенты, отражающие степень снижения риска после применения мер.

4. *Скорректированные вероятности $P_0(X_i)$* , учитывающие эффективность применяемых мер:

$$P(X_i) = P_0(X_i)(1 - R(X_i)). \quad (3)$$

5. *Энтропия $H(X_i)$:*

$$H(X_i) = -P(X_i) \log_2 P(X_i) - (1 - P(X_i)) \log_2 (1 - P(X_i)). \quad (4)$$

6. Информационная значимость $I(X_i)$:

$$I(X_i) = \frac{H(X_i)}{\sum_{j=1}^n H(X_j)}. \quad (5)$$

7. Общая вероятность аварии $P(A)$, вычисляемая по формуле (2).

Применение таблицы результативности и обновленный расчет энтропии и значимости. Предположим, что у нас есть следующая информация о результативности защитных мер для каждого фактора:

$R(X_1) = 0,4$ – снижение риска благодаря улучшению качества свайного основания;

$R(X_2) = 0,5$ – результативность улучшенных проектных решений;

$R(X_3) = 0,6$ – улучшение мониторинга и эксплуатационных условий;

$R(X_4) = 0,3$ – адаптация к климатическим изменениям.

Пересчет вероятностей. На основе предположений и результативности обновим вероятности:

$$P_0(X_1) = 0,7; \quad P(X_1) = 0,7(1 - 0,4) = 0,42.$$

$$P_0(X_2) = 0,6; \quad P(X_2) = 0,6(1 - 0,5) = 0,3.$$

$$P_0(X_3) = 0,5; \quad P(X_3) = 0,5(1 - 0,6) = 0,2.$$

$$P_0(X_4) = 0,4; \quad P(X_4) = 0,4(1 - 0,3) = 0,28.$$

Энтропия:

$$H(X_1) = -0,42 \log_2 0,42 - 0,58 \log_2 0,58 \approx 0,981;$$

$$H(X_2) = -0,3 \log_2 0,3 - 0,7 \log_2 0,7 \approx 0,881;$$

$$H(X_3) = -0,2 \log_2 0,2 - 0,8 \log_2 0,8 \approx 0,722;$$

$$H(X_4) = -0,28 \log_2 0,28 - 0,72 \log_2 0,72 \approx 0,855.$$

Общая энтропия:

$$\sum_{j=1}^4 H(X_j) = 0,981 + 0,881 + 0,722 + 0,855 = 3,439;$$

Информационная значимость:

$$I(X_1) = 0,981/3,439 \approx 0,285; \quad I(X_3) = 0,722/3,439 \approx 0,210;$$

$$I(X_2) = 0,881/3,439 \approx 0,256; \quad I(X_4) = 0,981/3,439 \approx 0,249.$$

Общая вероятность аварии:

$$P(A) = 1 - (1 - 0,42)(1 - 0,3)(1 - 0,2)(1 - 0,28) \approx 0,766.$$

Анализ результатов

Вероятность аварии $P(A) = 0,766$: снижение вероятности до 76,6 % указывает на уменьшение риска благодаря предпринятым мерам. Однако необходимо дальнейшее совершенствование защитных мер: повышение их результативности в целях снижения вероятности повторения аварийной ситуации.

Информационная значимость

$I(X_1) = 0,285$: увеличенная значимость несущей способности свай показывает необходимость дальнейшего контроля и модернизации.

$I(X_2) = 0,256$: значительное влияние проектирования подчеркивает важность качественного подхода к строительным работам.

$I(X_3) = 0,210$: улучшения в мониторинге и эксплуатации заметно снижают риск, однако остается возможность для дальнейших улучшений.

$I(X_4) = 0,249$: климатические условия продолжают оказывать значительное влияние, несмотря на принятые меры адаптации.

Применение модели

1. Анализ результативности мер: постоянная оценка результативности текущих мер и их корректировка на основе новых данных.
2. Целенаправленное распределение ресурсов: направление усилий и инвестиций в наиболее значимые области для снижения вероятности аварии.
3. Разработка стратегий адаптации: прогнозирование и подготовка к изменениям внешних условий, таких как климатические изменения, с учетом их влияния на эксплуатацию.

Таким образом, представленная модель с учетом результативности мер позволяет глубже понять структуру рисков и их динамику, а также улучшить процесс принятия решений в управлении безопасностью на промышленных объектах.

Заключение

Энтропийно-информационный анализ позволяет количественно оценить результативность различных мер по снижению риска, что помогает принимать обоснованные решения для улучшения безопасности и надежности систем. Применение этого метода к анализу аварий, как в случае с ТЭЦ-3, позволяет выявить наиболее значимые факторы риска и разработать эффективные меры по их снижению.

Таким образом, энтропийный анализ рисков ЧС является перспективным и эффективным подходом, который при надлежащем внедрении может существенно повысить уровень производственной безопасности предприятий и устойчивости техногенных систем за счет значительного снижения вероятности аварий на основе оценки результативности защитных мер, снижения неопределенности в системе производственной безопасности на основе оценки энтропии системы и оценки вклада каждой защитной меры в уменьшение неопределенности системы на основе оценки информационной значимости, особенно в контексте управления критическими рисками производственных процессов и производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vranken, I. A review on the use of entropy in landscape ecology: heterogeneity, unpredictability, scale dependence and their links with thermodynamics / I. Vranken, J. Baudry, M. Aubinet [et al.] // Landscape Ecology. – 2015. – Vol. 30. – P. 51–65. – DOI: 10.1007/s10980-014-0105-0.
2. Olbryś, J. Entropy-Based Applications in Economics, Finance, and Management / J. Olbryś // Entropy. – 2022. – Vol. 24, № 10. – Article 1468. – 3 p. – DOI: 10.3390/e24101468.
3. Cruces, S. Information Theory Applications in Signal Processing / S. Cruces, R. Martín-Clemente, W. Samek // Entropy. – 2019. – Vol. 21, № 7. – Article 653. – 4 p. – DOI: 10.3390/e21070653.
4. Белая книга о ликвидации последствий аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» и мерах, принятых компанией // Группа компаний «Норникель». – М.: Норникель, 2021. – 98 с. – URL: <https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/white-paper-2020.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).
5. Наш Крайний Север: отчет об устойчивом развитии Группы компаний «Норникель» за 2020 год // Группа компаний «Норникель». – М.: Норникель, 2020. – 250 с. – URL: https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/disclosure/NN_CSO2020_RUS_28.04.pdf (дата обращения: 20.09.2024).

**Энтропийный анализ чрезвычайных ситуаций техногенного характера:
методология и практическое применение**

Entropy analysis of technogenic emergencies: methodology and practical application

Крещу Ромина Маратовна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет», факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, кафедра экологии и природоохранной деятельности, аспирант

Адрес: ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1,
129226, г. Москва, Россия

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

SPIN-код: 8973-2818

Romina M. Kretsu

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Social University», Faculty of Comprehensive Security and Basics of Military Training, Chair of Ecology and Environmental Protection Activities, postgraduate student

Address: Wilhelm Pieck str., 4, building 1,
220118, Moscow, Russia

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

Рыбаков Анатолий Валерьевич

доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет», факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, кафедра экологии и природоохранной деятельности, профессор

Адрес: ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1,
129226, г. Москва, Россия

Email: a.rybakov@agz.50.mhs.gov.ru

SPIN-код: 8654-3788

Anatoliy V. Rybakov

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Social University», Faculty of Comprehensive Security and Basics of Military Training, Chair of Ecology and Environmental Protection Activities, Professor

Address: Wilhelm Pieck str., 4, building 1,
220118, Moscow, Russia

Email: a.rybakov@agz.50.mhs.gov.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

ENTROPY ANALYSIS OF TECHNOGENIC EMERGENCIES: METHODOLOGY AND PRACTICAL APPLICATION

Kretsu R.M., Rybakov A.V.

Purpose. This research aims to develop and test a methodology for entropy analysis to assess and predict technogenic emergencies. The study examines the theoretical foundations of entropy analysis, and identifies a set of key parameters and indicators used in this method. One of the objectives is to conduct a comparative analysis with traditional risk assessment methods and highlight the advantages of the proposed methodology.

Methods. The study employs systems analysis, entropy-based risk assessment, probabilistic-frequency analysis, and modeling and forecasting methods. Entropy analysis, based on the concept of measuring uncertainty and chaos in complex systems, allows for more accurate assessment of the likelihood of emergencies and prediction of their development.

Findings. The research demonstrates that the entropy approach has several advantages over traditional methods, such as greater flexibility and the ability to consider a wide range of risk factors. This method provides a deeper understanding of the mechanisms of technogenic disasters and significantly enhances the effectiveness of measures for their prevention and mitigation. The article also presents the results of applying the methodology to the case of the accident at Norilsk TPP-3, highlighting its practical significance.

Application field of research. The prediction and prevention of technogenic disasters in various industries, including energy, transport, and industrial production, is an important task that can be solved using the obtained data. This data can be used to optimize risk management, improve the safety and resilience of technogenic systems, as well as to develop standard methodologies and train specialists. The scientific and practical significance of the research lies in the creation of an effective tool for risk assessment and management under conditions of high uncertainty and complexity of modern technogenic systems. The application scope of the results emphasizes the importance of this research for various industries.

Keywords: risk management, entropy analysis, risk assessment, technogenic disasters, modeling methods, uncertainty analysis, crisis management, energy safety, accident prevention.

(The date of submitting: October 1, 2024)

REFERENCES

1. Vranken I., Baudry J., Aubinet M., Visser M., Bogaert J. A review on the use of entropy in landscape ecology: heterogeneity, unpredictability, scale dependence and their links with thermodynamics. *Landscape Ecology*, 2015. Vol. 30. P. 51–65. DOI: 10.1007/s10980-014-0105-0.
2. Olbryś J. Entropy-Based Applications in Economics, Finance, and Management. *Entropy*, 2022. Vol. 24, No. 10. Article 1468. 3 p. DOI: 10.3390/e24101468.
3. Cruces S., Martín-Clemente R., Samek W. Information Theory Applications in Signal Processing. *Entropy*, 2019. Vol. 21, No. 7. Article 653. 4 p. DOI: 10.3390/e21070653.
4. *Belaya kniga o likvidatsii posledstviy avarii na TETs-3 AO «NTEK» i merakh, prinyatykh kompaniy* [White Paper on liquidation of the consequences of the accident at TPP-3 of JSC Norilsk-Taimyr Energy Company and measures taken by the Nor Nickel Group]. Moscow: Nor Nickel Group, 2021. 98 p. URL: <https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/white-paper-2020.pdf> (date of access: September 20, 2024). (rus)
5. *Nash Krayniy Sever: otchet ob ustoychivom razvitii Gruppy kompaniy «Nornikel'» za 2020 god* [Our Far North: Nor Nickel Group Sustainability Report 2020]. Moscow: Nor Nickel Group, 2020. 250 p. URL: https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/disclosure/NN_CSO2020_RUS_28.04.pdf (date of access: September 20, 2024). (rus)

Copyright © 2024 Kretsu R.M., Rybakov A.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА РИСКОВ HAZOP/HAZID В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Закрута М.С.

Цель. Обзор методов анализа рисков HAZOP/HAZID для выявления возможности их применения к элементам пожарной безопасности на промышленных объектах.

Методы. Анализ рисков в системе управления безопасностью промышленных объектов. Системный подход к выявлению потенциальных опасностей и эксплуатационных проблем производственного объекта.

Результаты. Проведен анализ методов HAZOP и HAZID. Рассмотрены преимущества и недостатки этих методов, а также способы их использования в оценке рисков и управлении рисками на промышленных объектах.

Область применения исследований. Анализ последствий внедрения опасных факторов на ранних этапах разработки проектной документации. Разработка реестра типичных опасных факторов и последствий. Детальный анализ опасных факторов и рисков на всех этапах жизненного цикла производственного объекта.

Ключевые слова: HAZOP, HAZID, анализ рисков, пожарная безопасность, промышленная безопасность, управление рисками, нефтеперерабатывающая промышленность.

(Поступила в редакцию 9 октября 2024 г.)

Введение

В статье рассматриваются методы анализа рисков HAZOP (Hazard and Operability Study) и HAZID (Hazard Identification Study) в контексте обеспечения пожарной безопасности на производственных объектах. Особое внимание уделяется применению этих методов в Республике Беларусь. Анализируются теоретические основы методов, их методология, преимущества и ограничения. Представлен практический пример применения метода HAZOP для анализа пожарных рисков на нефтеперерабатывающем заводе. Рассматриваются вопросы интеграции методов HAZOP и HAZID в общую систему управления пожарными рисками, а также перспективы их развития в условиях технологического прогресса. Статья основана на анализе современных научных публикаций и нормативных документов в области пожарной безопасности.

В современном мире, где технологический прогресс неразрывно связан с возрастающими рисками в промышленности, особую актуальность приобретают вопросы обеспечения безопасности производственных объектов. Одним из ключевых аспектов этой проблемы является пожарная безопасность, которая требует постоянного совершенствования методов анализа и оценки рисков. В контексте Республики Беларусь, где промышленный сектор играет значительную роль в экономике, внедрение передовых методик анализа рисков становится не просто желательным, но необходимым условием устойчивого развития и защиты населения от техногенных угроз.

Основная часть

Методы HAZOP и HAZID представляют собой современные инструменты систематического анализа опасностей и рисков, которые получают все большее распространение в мировой практике. Их применение позволяет выявить потенциальные угрозы на ранних стадиях проектирования и эксплуатации объектов, что существенно снижает вероятность возникновения аварийных ситуаций, в том числе пожаров. Как отмечает Н.Н. Брушлинский, «пожарные риски являются неотъемлемой частью общей системы безопасности и требуют комплексного подхода к их оценке и управлению» [1, с. 15]. В этом контексте методы

HAZOP и HAZID предоставляют тот самый комплексный инструментарий, который позволяет учесть многофакторность и сложность современных производственных процессов.

Методы HAZOP и HAZID относятся к качественным методам анализа рисков и являются важными инструментами в системе управления безопасностью промышленных объектов. HAZOP представляет собой систематизированный подход к идентификации потенциальных опасностей и проблем эксплуатации, которые могут возникнуть в результате отклонений от проектных или рабочих условий [2]. HAZID, в свою очередь, является более общим методом, направленным на выявление и описание опасностей, которые могут привести к нежелательным последствиям [3].

А.В. Федосов и соавторы подчеркивают, что «применение методов HAZOP и HAZID позволяет систематически исследовать проект или действующий объект с целью выявления потенциальных опасностей и проблем, связанных с эксплуатацией» [4]. Это особенно важно в контексте пожарной безопасности, т.к. позволяет выявить не только очевидные источники возгорания, но и скрытые факторы, которые могут привести к пожару в результате сложных взаимодействий между различными элементами системы.

М.В. Лисанов отмечает, что «методика HAZOP основана на применении управляющих слов (гайд-вордов) к параметрам технологического процесса, что позволяет систематически исследовать возможные отклонения от нормального режима работы» [2, с. 3]. Такой подход обеспечивает всесторонний анализ потенциальных сценариев развития аварийных ситуаций, включая пожары.

В свою очередь, HAZID, как более общий метод, позволяет на ранних стадиях проектирования выявить основные опасности, связанные с объектом. С.А. Мазеин указывает, что «HAZID проводится на концептуальной стадии проекта и помогает определить основные риски, которые необходимо учитывать при дальнейшем проектировании» [3, с. 12].

Процесс проведения **HAZOP-анализа включает несколько ключевых этапов:**

1. Формирование команды экспертов из различных областей (технологи, инженеры по безопасности, операторы и др.).
2. Разделение системы на узлы для детального анализа.
3. Выбор параметров процесса для каждого узла (температура, давление, расход и т.д.).
4. Применение управляющих слов к каждому параметру (например, «нет», «больше», «меньше», «обратно» и др.).
5. Определение возможных причин и последствий отклонений.
6. Оценка существующих мер защиты и выработка рекомендаций по улучшению безопасности.

HAZID-анализ, в свою очередь, проводится по следующей схеме:

1. Определение границ системы и критериев опасности.
2. Составление перечня потенциальных опасностей на основе опыта, нормативных документов и экспертных знаний.
3. Систематический анализ каждого элемента системы на предмет наличия идентифицированных опасностей.
4. Оценка последствий реализации опасностей.
5. Разработка предварительных рекомендаций по снижению рисков.

А.А. Андреев и Д.В. Русских отмечают, что «комбинированное применение методов HAZOP и HAZID позволяет получить наиболее полную картину рисков на производственном объекте, включая риски возникновения пожаров» [5, с. 22]. Это утверждение подчеркивает важность комплексного подхода к анализу рисков в области пожарной безопасности.

При рассмотрении методов HAZOP и HAZID в контексте пожарной безопасности следует учитывать ряд специфических аспектов. Д.В. Пушкин и соавторы подчеркивают, что «при определении расчетных величин пожарного риска на производственных объектах необходимо учитывать не только статистические данные, но и результаты качественного анализа

опасностей» [6, с. 34]. В этом смысле методы HAZOP и HAZID предоставляют ценную информацию для более точной оценки пожарных рисков.

При проведении **HAZOP-анализа в контексте системы предотвращения пожара** особое внимание уделяется таким параметрам, как:

- температура процесса и оборудования;
- давление в системах и аппаратах;
- концентрация горючих веществ;
- наличие источников зажигания.

Для каждого из этих параметров применяются управляющие слова, позволяющие выявить потенциальные сценарии развития пожароопасных ситуаций. Например, применение управляющего слова «больше» к параметру температуры может выявить риск перегрева оборудования и возникновения пожара.

Важно отметить, что перечисленные выше параметры преимущественно относятся к системе предотвращения пожара как одному из элементов общей системы обеспечения пожарной безопасности. Однако, как подчеркивает Н.Н. Брушлинский, «комплексный подход к обеспечению пожарной безопасности требует учета всех элементов системы, включая противопожарную защиту и организационно-технические мероприятия» [1, с. 18].

В связи с этим при проведении HAZOP-анализа также необходимо рассматривать параметры:

системы противопожарной защиты:

- работоспособность и исправность системы пожарной сигнализации;
- работоспособность и исправность автоматических установок пожаротушения;
- достаточность и исправность первичных средств пожаротушения;
- работоспособность и исправность систем противодымной вентиляции (вытяжной и приточной);
- состояние эвакуационных путей и выходов;
- состояние конструкций с нормированным пределом огнестойкости и классом пожарной опасности;
- функционирование системы оповещения и управления эвакуацией и др. [6, с. 34];

организационно-технических мероприятий:

- соблюдение регламентов технического обслуживания оборудования;
- подготовка персонала;
- наличие и актуальность планов эвакуации;
- периодичность проведения противопожарных тренировок;
- состояние документации по пожарной безопасности (инструкции, положения, приказы по пожарной безопасности и др.) [7, с. 28].

Как отмечает С.Н. Шатило, «эффективность HAZOP-анализа в контексте пожарной безопасности существенно повышается при комплексном рассмотрении всех элементов системы обеспечения пожарной безопасности объекта» [7, с. 30]. Это позволяет выявить не только технологические риски, но и организационные недостатки, которые могут привести к возникновению пожароопасных ситуаций или снизить эффективность противопожарной защиты.

HAZID-анализ в контексте пожарной безопасности фокусируется на идентификации:

- потенциальных источников возгорания;
- мест скопления горючих материалов;
- путей распространения пожара;
- уязвимостей в системах противопожарной защиты.

С.Н. Шатило отмечает, что «исследование и оценка пожарной опасности производственных объектов должны учитывать не только стандартные сценарии развития пожара, но и маловероятные события, которые могут привести к катастрофическим последствиям» [7,

с. 25]. Методы HAZOP и HAZID благодаря своей систематичности позволяют выявить и такие нестандартные сценарии.

Основными преимуществами применения методов HAZOP и HAZID в области пожарной безопасности являются:

1. Систематичность в выявлении опасностей, позволяющая минимизировать вероятность упущения важных факторов риска.
2. Возможность выявления скрытых и неочевидных опасностей, которые могут быть пропущены при использовании традиционных методов анализа.
3. Всесторонность анализа, достигаемая благодаря участию специалистов различных профилей.
4. Создание детальной документации по результатам анализа, которая может быть использована для дальнейшего совершенствования системы безопасности.

Н.Н. Брушлинский и соавторы подчеркивают, что «применение современных методов анализа рисков, таких как HAZOP и HAZID, позволяет существенно повысить уровень пожарной безопасности на объектах за счет более глубокого понимания взаимосвязей между различными факторами риска» [8, с. 87].

Однако, несмотря на значительные преимущества, методы HAZOP и HAZID имеют определенные **ограничения**:

1. Высокая трудоемкость и временные затраты на проведение анализа, особенно для сложных производственных систем.
2. Зависимость качества результатов от компетенции и опыта экспертной группы.
3. Сложность учета человеческого фактора и организационных аспектов в рамках анализа.
4. Отсутствие количественной оценки рисков, что может затруднить принятие решений о приоритетности мер по снижению рисков.

М.О. Кузнецова отмечает, что «для преодоления ограничений качественных методов анализа рисков, таких как HAZOP и HAZID, целесообразно их комбинирование с количественными методами оценки рисков» [9, с. 57]. Такой комплексный подход позволяет получить наиболее полную и объективную картину рисков на производственном объекте.

В Республике Беларусь, как и во многих других странах, методы HAZOP и HAZID находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности, включая нефтехимическую, энергетическую и машиностроительную. Однако, как отмечают эксперты, процесс внедрения этих методов в практику белорусских предприятий сталкивается с рядом вызовов.

Один из ключевых вопросов заключается в адаптации международных методик к местным условиям и нормативно-правовой базе. В этом контексте важную роль играет работа национальных научно-исследовательских институтов и университетов по разработке методических рекомендаций и обучению специалистов.

С.Н. Шатило подчеркивает, что «для эффективного внедрения методов HAZOP и HAZID в практику обеспечения пожарной безопасности на белорусских предприятиях необходимо развивать культуру безопасности и повышать осведомленность руководителей о преимуществах систематического анализа рисков» [7, с. 40].

Для иллюстрации практического применения метода HAZOP в контексте пожарной безопасности рассмотрим пример анализа ректификационной колонны на нефтеперерабатывающем заводе.

Шаг 1. Определение узла анализа.

Узел: ректификационная колонна для разделения нефтепродуктов.

Шаг 2. Выбор параметров процесса: температура в колонне, давление в колонне, уровень жидкости в кубе колонны, расход флегмы.

Шаг 3. Применение управляющих слов. Рассмотрим применение управляющего слова «больше» к параметру «температура в колонне».

Шаг 4. Определение отклонений, причин и последствий.

Отклонение: повышение температуры в колонне выше проектного значения.

Возможные причины:

1. Неисправность системы регулирования температуры.
2. Избыточная подача тепла в куб колонны.
3. Снижение расхода флегмы.

Возможные последствия:

1. Повышение давления в колонне.
2. Нарушение процесса разделения нефтепродуктов.
3. Повышение риска разгерметизации оборудования.
4. Повышение пожароопасности из-за увеличения испарения легковоспламеняющихся фракций.

Шаг 5. Оценка существующих мер защиты.

1. Система автоматического регулирования температуры.
2. Предохранительные клапаны на колонне.
3. Система противопожарной защиты (датчики температуры, системы пожаротушения).

Шаг 6. Рекомендации по улучшению безопасности.

1. Установка дополнительных датчиков температуры в зонах повышенного риска: зона ввода сырья, зона вывода кубового остатка, зона максимальной температуры процесса ректификации.
2. Внедрение системы предиктивной аналитики для раннего выявления тенденций к повышению температуры.
3. Модернизация системы охлаждения флегмы для обеспечения стабильного расхода.
4. Проведение дополнительного обучения персонала по действиям в нештатных ситуациях, связанных с повышением температуры в колонне.

Этот пример демонстрирует, как метод HAZOP позволяет систематически анализировать потенциальные опасности и разрабатывать меры по их предотвращению. М.В. Лисанов отмечает, что «применение метода HAZOP при анализе технологических процессов нефтепереработки позволяет выявить до 95 % потенциальных опасностей, связанных с отклонениями параметров процесса» [2, с. 7].

Для интеграции качественных и количественных показателей при анализе рисков рассмотрим конкретные параметры для данного примера. Как отмечает Д.В. Пушкин, «определение расчетных величин пожарного риска должно основываться на анализе статистических данных и учете специфики конкретного производственного объекта» [6, с. 34]. В случае ректификационной колонны *критическими количественными показателями* являются:

1. Допустимые значения технологических параметров [2, с. 4–5]:

- рабочая температура в колонне: 180–220 °С (критическое значение 240 °С);
- рабочее давление: 0,2–0,4 МПа (критическое значение 0,6 МПа).

2. Вероятностные характеристики [8, с. 156–157]:

- частота разгерметизации оборудования при превышении расчетных параметров: 1×10^{-5} год⁻¹;
- вероятность возникновения пожара при наличии источника зажигания: 0,05.

3. Критерии приемлемого риска:

- индивидуальный пожарный риск для персонала: не более 10^{-6} год⁻¹ [1, с. 25]¹;
- социальный пожарный риск: в Беларуси – нормативно не закреплён, в России – не более 10^{-5} год⁻¹ [1, с. 26].

Как указывает Н.Н. Брушлинский, «интеграция качественных результатов HAZOP-анализа с количественными показателями позволяет создать комплексную систему оценки рисков» [8, с. 167]. При этом выявленные в ходе HAZOP-анализа отклонения параметров

¹ Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Взамен ГОСТ 12.1.004-85; введ. 01.07.1992. – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

процесса используются для построения деревьев отказов и событий, что позволяет рассчитать вероятность реализации различных сценариев развития аварийной ситуации.

Для обеспечения комплексного анализа пожарной безопасности рассмотрим также другие элементы рассматриваемой системы оценки рисков.

Система противопожарной защиты

Параметр: работоспособность и исправность системы пожарной автоматики (в разрезе автоматических установок пожаротушения).

Управляющее слово: «нет».

Отклонение: отсутствие срабатывания установок пожаротушения.

Причины: неисправность датчиков, отказ исполнительных механизмов, нарушение электроснабжения.

Последствия: неконтролируемое горение, увеличение времени тушения, повышенный материальный ущерб.

Существующие меры защиты: резервные источники питания, дублирование систем обнаружения, наличие ручных средств пожаротушения.

Рекомендации: внедрение системы предиктивной диагностики, модернизация алгоритмов управления [6, с. 35].

Организационно-технические мероприятия

Параметр: готовность персонала к действиям при пожаре.

Управляющее слово: «не полностью».

Отклонение: недостаточный уровень подготовки персонала.

Причины: формальный подход к обучению, редкое проведение тренировок, отсутствие актуальных инструкций.

Последствия: увеличение времени реагирования, ошибки при эвакуации, неправильные действия по тушению.

Существующие меры защиты: программы обучения, планы эвакуации.

Рекомендации: внедрение компьютерных тренажеров, увеличение частоты практических занятий, разработка детальных алгоритмов действий [7, с. 32].

Интеграция HAZOP- и HAZID-анализа в систему управления пожарными рисками. Эффективное применение методов HAZOP и HAZID требует их интеграции в общую систему управления пожарными рисками на предприятии. Н.Н. Брушлинский и соавторы подчеркивают, что «управление пожарными рисками должно быть непрерывным процессом, охватывающим все этапы жизненного цикла объекта – от проектирования до вывода из эксплуатации» [8, с. 102]. В этом контексте HAZOP и HAZID становятся важными инструментами на различных этапах этого процесса.

На этапе проектирования новых объектов или модернизации существующих HAZID-анализ позволяет выявить потенциальные пожарные опасности и учесть их при разработке проектных решений. HAZOP, в свою очередь, может применяться для детального анализа технологических процессов и систем противопожарной защиты.

В процессе эксплуатации объекта методы HAZOP и HAZID могут использоваться для периодической переоценки рисков, особенно в случаях изменения технологических процессов или условий эксплуатации. А.В. Федосов и соавторы отмечают, что «регулярное проведение HAZOP-анализа позволяет выявлять новые риски, возникающие в процессе эксплуатации, и своевременно принимать меры по их снижению» [4, с. 330].

Интеграция результатов HAZOP- и HAZID-анализа в систему управления пожарными рисками может включать следующие аспекты:

1. Использование выявленных сценариев развития аварийных ситуаций для разработки и актуализации планов ликвидации аварий и пожаротушения.
2. Учет результатов анализа при разработке программ обучения и тренировок персонала.

3. Применение выводов HAZOP- и HAZID-анализа для оптимизации систем технического обслуживания и ремонта оборудования.

4. Использование результатов анализа при разработке и корректировке производственных инструкций и регламентов.

С.Н. Шатило подчеркивает, что «эффективная интеграция методов анализа рисков в систему управления пожарной безопасностью требует поддержки со стороны высшего руководства предприятия и формирования соответствующей культуры безопасности» [7, с. 42].

Развитие технологий и усложнение производственных процессов создают новые вызовы в области пожарной безопасности, что требует постоянного совершенствования методов анализа рисков. В этом контексте можно выделить несколько перспективных направлений развития методов HAZOP и HAZID:

1. Интеграция с методами машинного обучения и искусственного интеллекта для автоматизации процесса выявления потенциальных опасностей и анализа больших объемов данных.

2. Разработка специализированных программных комплексов, позволяющих проводить HAZOP- и HAZID-анализ в виртуальной среде с использованием цифровых двойников производственных объектов.

3. Адаптация методов для анализа рисков, связанных с новыми технологиями, такими как аддитивное производство, нанотехнологии, возобновляемые источники энергии.

4. Разработка методик количественной оценки рисков на основе результатов HAZOP- и HAZID-анализа для более обоснованного принятия решений по управлению рисками.

М.О. Кузнецова отмечает, что «развитие методов количественной оценки факторов риска, выявленных в ходе HAZOP- и HAZID-анализа, позволит повысить эффективность управления пожарными рисками на промышленных объектах» [9, с. 59].

Важно отметить принципиальные **отличия методов HAZOP/HAZID от методов построения деревьев отказов и событий**. Как указывает М.В. Лисанов, «HAZOP и HAZID представляют собой индуктивные методы анализа, идущие от частного к общему, в то время как метод дерева отказов является дедуктивным, направленным от общего к частному» [2, с. 3]. Для наглядной демонстрации этих различий рассмотрим пример построения дерева событий для случая разгерметизации ректификационной колонны.

А.В. Федосов подчеркивает, что «методы HAZOP/HAZID позволяют выявить потенциальные опасности на более ранних стадиях анализа, чем построение деревьев отказов, что делает их особенно ценными на этапе проектирования» [4, с. 325]. При этом построение деревьев отказов и событий часто становится логическим продолжением HAZOP/HAZID-анализа, позволяя количественно оценить вероятности реализации выявленных опасных ситуаций.

Ключевые отличия методов включают:

1. HAZOP/HAZID помогают выявить потенциальные проблемы на ранних стадиях, в то время как деревья отказов позволяют глубже понять механизмы, приводящие к отказам, что может быть полезно для разработки мер по их предотвращению.

Оба метода важны для управления рисками, но они дополняют друг друга, обеспечивая комплексный подход к анализу безопасности и надежности систем.

2. HAZOP/HAZID требуют командного подхода и экспертной оценки, тогда как построение деревьев отказов может выполняться индивидуально на основе технической документации [3, с. 15].

3. HAZOP/HAZID более эффективны для анализа сложных технологических систем с множественными параметрами, а деревья отказов лучше подходят для анализа конкретных нежелательных событий [2, с. 4].

Заключение

Таким образом, методы HAZOP и HAZID играют ключевую роль в обеспечении пожарной безопасности производственных объектов, предоставляя системный подход к выявлению

и анализу потенциальных опасностей. Их дальнейшее развитие и интеграция с современными технологиями открывают новые возможности для повышения уровня пожарной и промышленной безопасности за счет снижения вероятности возникновения пожаров и аварий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брушлинский, Н.Н. Пожарные риски. Выпуск 1. Основные понятия / Н.Н. Брушлинский, Ю.М. Глуховенко, В.Б. Коробко [и др.]: под ред. Н.Н. Брушлинского. – М.: Национальная академия наук пожарной безопасности, 2004. – 47 с.
2. Лисанов, М.В. Применение методов анализа опасностей HAZID и HAZOP при проектировании газотранспортного терминала / М.В. Лисанов, В.В. Симакин, А.И. Макушенко [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 8. – С. 63–70. – EDN: MVYGAV.
3. Мазеин, С.А. HAZOP и HAZID – практическое руководство: пособие для самостоятельной подготовки / С.А. Мазеин. – Пермь: Протект Бизнес Ресурс, 2019. – 47 с.
4. Федосов, А.В. Анализ опасностей, оценка риска аварий на опасных производственных объектах и рекомендации по выбору методов анализа риска / А.Ф. Федосов, Г.Р. Маннанова, Ю.А. Шипилова // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2016. – № 3. – С. 322–336. – EDN: WCODTJ.
5. Андреев, А.А. Основные подходы к оценке пожарного риска производственных объектов / А.А. Андреев, Д.В. Русских // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 20–23. – EDN: YQIEXB.
6. Пушкин, Д.В. Определение расчетных величин пожарного риска на территории производственных объектов / Д.В. Пушкин, А.Р. Файзрахманов, С.А. Химин, Д.В. Галенко // Молодой ученый. – 2022. – № 7 (402). – С. 33–35. – EDN: WNLVIJ.
7. Шатило, С.Н. Исследование и оценка пожарной опасности производственных объектов: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторной работы / С.Н. Шатило, С.В. Дорошко, В.В. Карпенко. – Гомель: БелГУТ, 2014. – 48 с. – ISBN 978-985-554-299-6.
8. Брушлинский, Н.Н. Основы теории пожарных рисков и ее приложение / Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Клепко Е.А. [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 192 с.
9. Кузнецова, М.О. Методика количественной оценки факторов риска промышленных организаций / М.О. Кузнецова // Экономические науки. – 2019. – № 11 (180). – С. 54–60. – DOI: 10.14451/1.18054. – EDN: OPNYOD.

**Применение методов анализа рисков HAZOP/HAZID в системе управления
пожарной и промышленной безопасностью**
**Application of HAZOP/HAZID risk analysis methods in fire
and industrial safety management system**

Закрута Максим Сергеевич

Открытое акционерное общество
«Минский вагоноремонтный завод»,
ведущий инженер по промышленной
безопасности

Адрес: ул. Железнодорожная, 5/1,
220014, г. Минск, Беларусь

Email: maxim.zakruta@yandex.by

Maksim S. Zakruta

Open Joint Stock Company
«Minsk Carriage Repair Plant»,
Lead Industrial Safety Engineer

Address: Zheleznodorozhnaya str., 5/1,
220014, Minsk, Belarus

Email: maxim.zakruta@yandex.by

ORCID: 0009-0008-0642-6674

APPLICATION OF HAZOP/HAZID RISK ANALYSIS METHODS IN FIRE AND INDUSTRIAL SAFETY MANAGEMENT SYSTEM

Zakruta M.S.

Purpose. To review HAZOP/HAZID risk analysis methods to determine their applicability to fire safety elements at industrial facilities.

Methods. Risk analysis in the safety management system of industrial facilities. System approach to identification of potential hazards and operational problems of the industrial facility.

Findings. HAZOP and HAZID methods are analyzed. The advantages and disadvantages of these methods, as well as ways of their use in risk assessment and risk management at industrial facilities are considered.

Application field of research. Analysis of consequences of introduction of hazardous factors at early stages of design documentation development. Development of a register of typical hazardous factors and consequences. Detailed analysis of hazardous factors and risks at all stages of the life cycle of an industrial facility.

Keywords: HAZOP, HAZID, risk analysis, fire safety, industrial safety, risk management, oil refining industry.

(The date of submitting: October 9, 2024)

REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Glukhovenko Yu.M., Korobko V.B., Sokolov S.V., Vagner P., Lupanov S.A., Klepko E.A. *Pozharnye riski. Vypusk 1. Osnovnye ponyatiya* [Fire risks. Issue 1. Basic concepts]. Moscow: National Academy of Fire Safety Sciences, 2004. 47 p. (rus)
2. Lisanov M.V., Simakin V.V., Makushenko A.I., Dvornichenko P.I., Ereemeev-Raykhert A.V. *Primenenie metodov analiza opasnostey HAZID i HAZOP pri proektirovanii gazotransportnogo terminala* [Application of hazard analysis methods HAZID and HAZOP in the design of a gas transportation terminal]. *Occupational Safety in Industry*, 2008. No. 8. Pp. 63–70. (rus). EDN: MVYGAV.
3. Mazein S.A. *HAZOP i HAZID – prakticheskoe rukovodstvo: posobie dlya samostoyatel'noy podgotovki* [HAZOP and HAZID – a practical guide: self-study manual]. Perm: Protekt Biznes Resurs, 2019. 47 p.
4. Fedosov A.V., Mannanova G.R., Shipilova Yu.A. *Analiz opasnostey, otsenka riska aviariy na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh i rekomendatsii po vyboru metodov analiza riska* [The analysis of dangers, assessment of risk of accidents on hazardous production facility and the recommendation about the choice of methods of the analysis of risk]. *Network Journal «Oil and Gas Business»*, 2016. No. 3. Pp. 322–336. (rus). EDN: WCOTJ.
5. Andreev A.A., Russkikh D.V. *Osnovnye podkhody k otsenke pozharnogo riska proizvodstvennykh ob'ektov* [The main approaches to assessment of fire risk industrial facilities]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*, 2018. Vol. 1, No. 9. Pp. 20–23. (rus). EDN: YQIEXB.
6. Pushkin D.V., Fayzirakhmanov A.R., Khimin S.A., Galenko D.V. *Opreделение raschetnykh velichin pozharnogo riska na territorii proizvodstvennykh ob'ektov* [Determination of estimated values of fire risk on the territory of production facilities]. *Young Scientist*, 2022. No. 7 (402). Pp. 33–35. (rus). EDN: WNLVIJ.
7. Shatilo S.N., Doroshko S.V., Karpenko V.V. *Issledovanie i otsenka pozharnoy opasnosti proizvodstvennykh ob'ektov* [Research and assessment of fire hazard at industrial facilities]: teaching aid for laboratory work execution. Gomel: Belarusian State University of Transport, 2014. 48 p. (rus). ISBN 978-985-554-299-6.
8. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Klepko E.A., Belov V.A., Ivanova O.V., Popkov S.Yu. *Osnovy teorii pozharnykh riskov i ee prilozhenie* [Fundamentals of fire risk theory and its application]. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2012. 192 p. (rus)
9. Kuznetsova M.O. *Metodika kolichestvennoy otsenki faktorov riska promyshlennykh organizatsiy* [Methodology of quantitative assessment of risk factors of industrial organizations]. *Economic Sciences*, 2019. No. 11 (180). Pp. 54–60. (rus). DOI: 10.14451/1.18054. EDN: OPNYOD.

Copyright © 2024 Zakruta M.S.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ ПО ОКАЗАНИЮ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ У РУКОВОДИТЕЛЕЙ И РАБОТНИКОВ ОРГАНОВ И ОРГАНИЗАЦИЙ

Маршалко О.В., Панасевич В.А., Цинкевич О.И.

Цель. Изучение уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи у руководителей и работников органов и организаций.

Методы. Пилотажное исследование «Оценка уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи у руководителей и работников органов и организаций» (далее – пилотажное исследование) с использованием социологического метода онлайн-опроса Computer Assisted WEB Interviewing (CAWI) и последующим анализом результатов с применением Statistical Package for the Social Sciences (SPSS).

Результаты. Результаты пилотажного исследования показали, что слушатели государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», обучающиеся по образовательной программе повышения квалификации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, выразили активную заинтересованность в обучении методам оказания первой помощи. Среди препятствий по оказанию первой помощи респонденты отметили недостаточный уровень подготовки по первой помощи (27,3 %) и боязнь неправильного оказания первой помощи (25,9 %). Респонденты, заявляющие о знании всех методов оказания первой помощи (36,8 %), чаще получали информацию благодаря прохождению специализированных курсов. Анализ уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека, показал, что алгоритм проведения сердечно-легочной реанимации является проблемной областью даже на уровне знаний.

Область применения исследований. Результаты пилотажного исследования будут использованы при проведении полномасштабного социологического исследования, направленного на совершенствование принципов, подходов, средств обучения и методик преподавания медицинской защиты населения слушателям Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Ключевые слова: оказание первой помощи, пилотажное исследование, уровень сформированности компетенций, руководители и работники, чрезвычайные ситуации.

(Поступила в редакцию 8 октября 2024 г.)

Введение

Первая помощь представляет собой комплекс мероприятий, осуществляемых до оказания медицинской помощи пострадавшему при несчастных случаях, травмах, отравлениях, других состояниях и заболеваниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека, в целях прекращения воздействия на организм пострадавшего повреждающего фактора внешней среды, оказания ему помощи в зависимости от характера и вида травмы и обеспечения максимально благоприятных условий транспортировки (эвакуации) пострадавшего с места получения травмы в организацию здравоохранения¹.

При чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера, актах терроризма и массовых беспорядках спасатели, сотрудники органов внутренних дел и иные физические лица, прошедшие обучение методам оказания первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека, обязаны принимать неотложные меры по спасению граждан, оказанию нуждающимся первой помощи².

¹ О здравоохранении: Закон Респ. Беларусь от 18 июня 1993 г. № 2435-XII: в ред. от 25 окт. 2023 г. № 308-З // iLex: информ. правовая система (дата обращения: 04.10.2024).

² См. сноску 1.

Первая помощь является важнейшим фактором в спасении жизни и здоровья человека при чрезвычайных ситуациях, поэтому вопросу обучения разных контингентов населения оказанию первой помощи уделяется большое внимание. С 2018 г. в Республике Беларусь создана и функционирует единая государственная система обучения населения методам оказания первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека³.

Результаты социологических исследований, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, демонстрируют неготовность населения к оказанию первой помощи, что главным образом обусловлено дефицитом знаний и навыков оказания первой помощи, а также боязнью причинить вред пострадавшему и опасениями о возможной юридической ответственности [1–3]. Многие опросы говорят об эффективности курсов по оказанию первой помощи, об улучшении навыков по их итогам, о высокой удовлетворенности ими [3; 4]. Однако не до конца понятно, какие ситуации должны быть освещены на них в первую очередь, с какими ситуациями население справляется лучше и т.д.

Необходимо отметить, что вопросы компетентности населения по оказанию первой помощи многогранно рассматриваются многими авторами как в аспекте отдельных состояний, так и вопросов оказания первой помощи в целом [3; 5–7]. Вместе с тем исследованию уровня реальных знаний по оказанию первой помощи уделяется значительно меньше внимания, что затрудняет разработку направлений совершенствования системы обучения населения оказанию первой помощи.

Таким образом, существует необходимость изучить уровень сформированности компетенций различных категорий населения по оказанию первой помощи, определить актуальное состояние вопроса для повышения эффективности по работе в данном направлении.

Основная часть

Источником получения и сбора данных для изучения уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи у руководителей и работников органов и организаций стало проведение с 16 по 27 сентября 2024 г. пилотажного исследования. Цель пилотажного исследования – выявление потенциальных проблем и получение предварительных данных уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи у руководителей и работников органов и организаций. Пилотажное исследование проводилось на базе Образовательного центра безопасности жизнедеятельности МЧС Республики Беларусь с использованием социологического метода сбора и анализа данных – онлайн-опроса с помощью Computer Assisted WEB Interviewing (CAWI). Объектом пилотажного исследования являлись слушатели Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», обучающиеся по образовательной программе повышения квалификации руководящих работников и специалистов в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Инструментарий пилотажного исследования разработан с учетом всех требований анкетного опроса в рамках социологического исследования. Анкета включала 16 вопросов, разделенных на закрытые, открытые с выбором ответа и с множественным выбором. Вопросы составлены с использованием различных видов шкал: номинальных, порядковых, дихотомических.

³ • О создании и функционировании единой государственной системы обучения населения методам оказания первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 22 дек. 2014 г. № 1221: в ред. от 19 сент. 2016 г. № 737 // iLex: информ. правовая система (дата обращения: 04.10.2024).

• О единой государственной системе обучения населения методам оказания первой помощи: постановление Министерства здравоохранения Респ. Беларусь от 7 авг. 2018 г. № 63 // iLex: информ. правовая система (дата обращения: 04.10.2024).

Отдельный блок вопросов был разработан для сбора социально-демографических и профессиональных характеристик респондентов, таких как пол, возраст, должность, регион проживания.

Выборка респондентов в пилотажном исследовании формировалась случайным образом на добровольной основе, анонимно. Респонденты использовали ссылку для перехода на сайт (<https://www.questionstar.ru>) со страницей анкетного исследования профессионального конструктора онлайн-опросов. Собранные анкеты проверялись на достоверность, полноту и качество заполнения. За период опроса респондентов было собрано 88 анкет. По результатам проведенного анализа из 88 анкет 12 анкет оказались низкого качества, полноты заполнения и были исключены из дальнейшего анализа. Таким образом, окончательный набор данных для анализа составил 76 анкет.

Выборка не является репрезентативной, вместе с тем в выборку были включены представители различных экспертных групп, релевантных целям пилотажного исследования, что позволило выявить практическую ценность результатов пилотажного исследования и получить предварительные данные, которые будут использованы для обоснования проведения полномасштабного социологического исследования, направленного на изучение проблем, которые ранее не изучались.

Данные пилотажного исследования проверены на качество, систематизированы и проанализированы с помощью Statistical Package for the Social Sciences (SPSS). Анализ проводился на основе основных статистических показателей (%) с визуализацией частотного распределения количественных данных в виде статистических графиков.

Анализ качественного состава респондентов показал, что в пилотажном исследовании приняли участие 61,8 % мужчин и 38,2 % женщин. Наибольшая часть опрошенных представляет возрастную группу 32–55 лет – 77,6 %. Распределение респондентов в разрезе должностей показало, что в пилотажном исследовании приняли участие представители различных экспертных групп. Большинство опрошенных являются работниками организаций, предприятий и учреждений всех форм собственности с количеством работающих 300 и более человек, обеспечивающих выполнение мероприятий гражданской обороны и задач в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (25 %), заместители руководителей организаций с количеством работающих 300 и более человек (18,40 %) и начальники отделов районных (городских) исполнительных комитетов (17,1 %) (рис. 1).

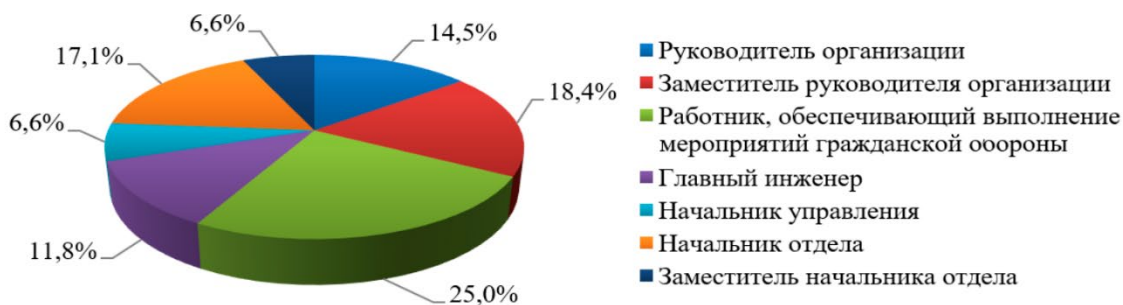


Рисунок 1. – Распределение респондентов в разрезе должностей

Большинство опрошенных являются жителями г. Минска (27,6 %) и Минской области (18,4 %), что соответствует распределению численности населения по регионам Республики Беларусь (рис. 2).

Анализ результатов пилотажного исследования показал, что три четверти респондентов (73,7 %) не проходили обучение методам оказания первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека. Вместе с тем 53,9 % респондентов известен перечень состояний, при которых оказывается первая помощь. Более половины опрошенных респондентов (60,5 %) утверждают, что в той или иной степени знакомы с некоторыми методами оказания первой помощи.

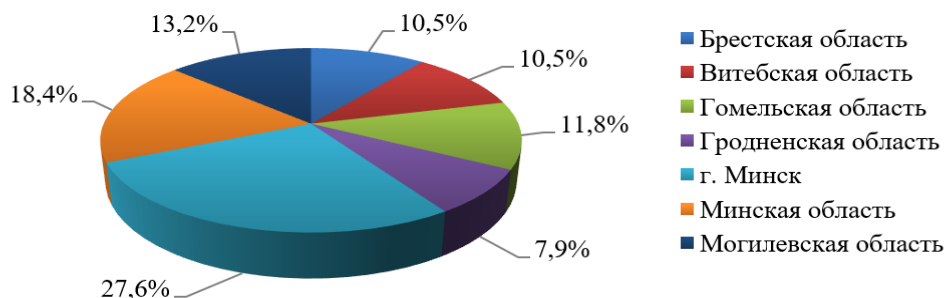


Рисунок 2. – Распределение респондентов в разрезе регионов проживания

Основным источником знаний о методах оказания первой помощи респонденты указали информационно-наглядные материалы в общественных местах (35,5 %), учреждения образования (26,3 %), средства массовой информации (21,1 %) и прохождение специализированных курсов (17,1 %) (рис. 3). Необходимо отметить, что респонденты, заявляющие о знании всех методов оказания первой помощи (36,8 %), чаще получали информацию благодаря прохождению специализированных курсов.

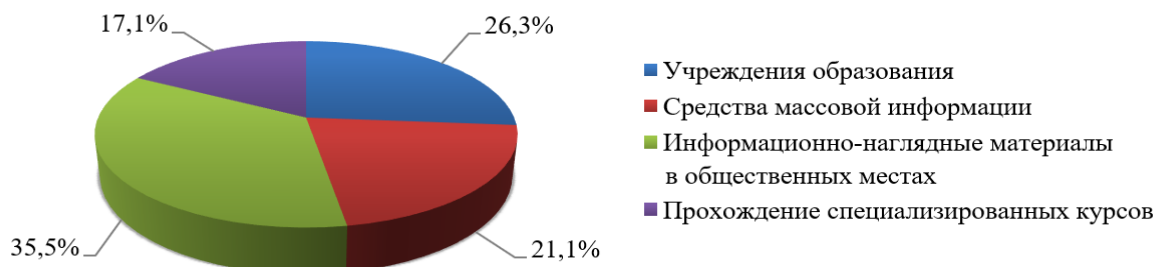


Рисунок 3. – Распределение ответов респондентов об основных источниках знаний о методах оказания первой помощи

Среди препятствий к оказанию первой помощи респонденты отметили: недостаточный уровень подготовки по оказанию первой помощи (27,3 %); боязнь неправильного оказания первой помощи (25,9 %); опасения о возможном причинении вреда пострадавшему (24,5 %); низкую информированность о вариантах исхода травмы или внезапного заболевания у пострадавшего (11,5 %); отсутствие уверенности в эффекте от оказания первой помощи (5,8 %); боязнь наступления юридической ответственности за неблагоприятный исход травмы или внезапного заболевания у пострадавшего (5 %) (рис. 4).

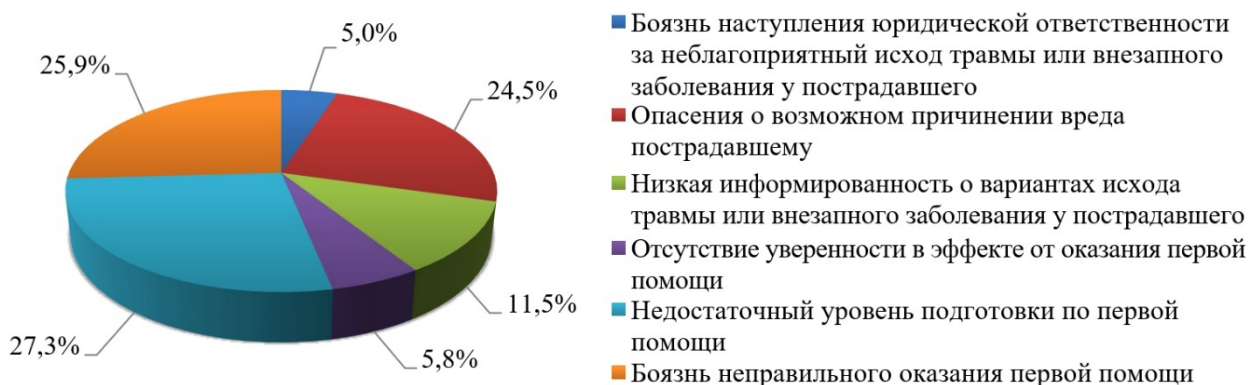


Рисунок 4. – Распределение ответов респондентов о препятствиях при оказании первой помощи

Основные номера вызова скорой медицинской помощи («103», «112») указали 85,1 % респондентов, из них значительно чаще отмечали номер «103» (69,2 %), номер «112» (15,9 %). При этом 14,9 % ответивших приводили, наряду с корректным, некорректный номер.

Большинство опрошенных (78,9 %) считает, что оказание первой помощи пострадавшим позволяет снизить смертность от травм и состояний, представляющих угрозу для жизни

и (или) здоровья человека. Оказывали когда-либо первую помощь 28,9 % респондентов. При этом значимо чаще данный ответ указывали те, кто считает, что знает методы оказания первой помощи. Хотели бы обучиться правилам оказания первой помощи 100 % опрошенных.

Анализ уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека, у руководителей и работников органов и организаций показал, что навыками оказания первой помощи при потере сознания владеет 31,6 % опрошенных (рис. 5) алгоритмом проведения сердечно-легочной реанимации – 27,6 % (рис. 6). Вместе с тем большинство респондентов (77,6 %) правильно определили показания к проведению сердечно-легочной реанимации (рис. 7).

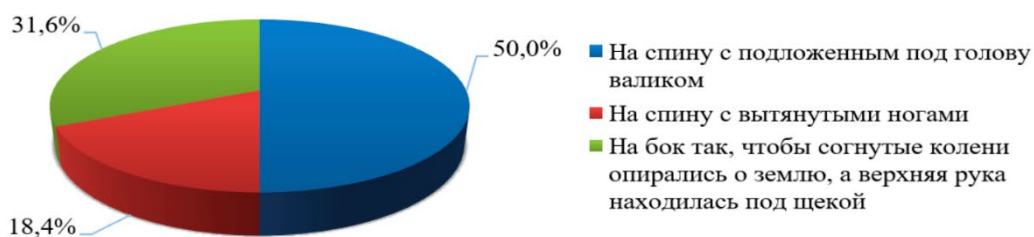


Рисунок 5. – Уровень сформированности компетенций респондентов по выбору оптимальной позы для пострадавшего с потерей сознания и наличии пульса на сонной артерии

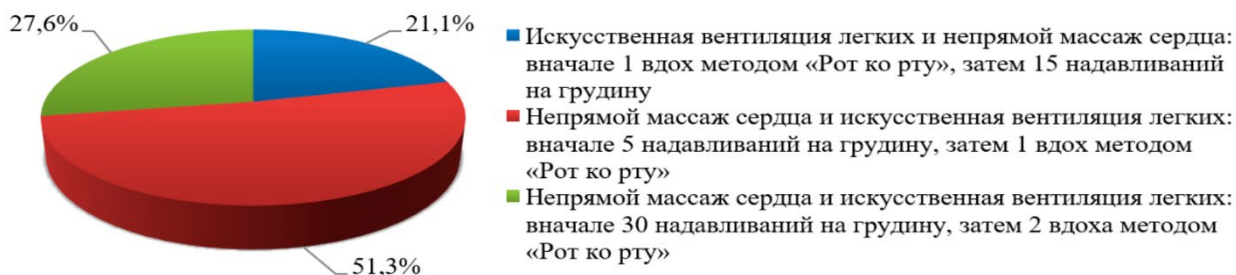


Рисунок 6. – Уровень сформированности компетенций респондентов согласно алгоритму проведения сердечно-легочной реанимации пострадавшему



Рисунок 7. – Уровень сформированности компетенций респондентов по определению показаний к проведению сердечно-легочной реанимации пострадавшему

Большинство респондентов показали высокий уровень сформированности компетенций по оказанию первой помощи при артериальном кровотечении (81,6 %) (рис. 8) и венозном кровотечении (51,3 %) (рис. 9).

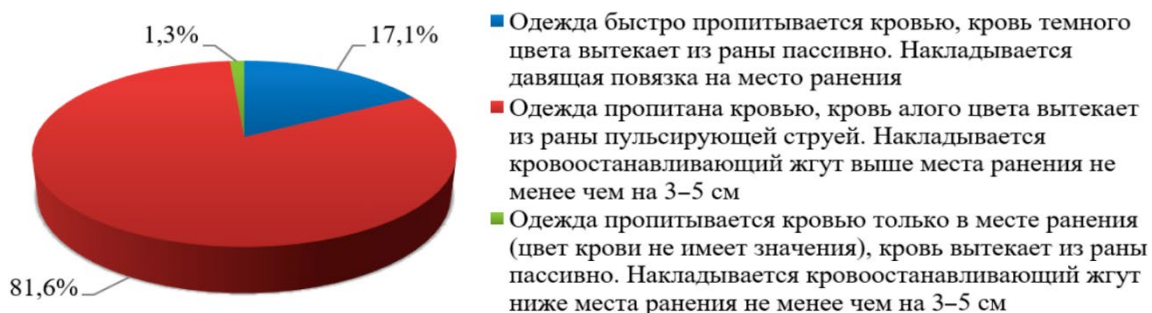


Рисунок 8. – Уровень сформированности компетенций респондентов по определению признаков кровотечения из крупной артерии и оказанию первой помощи при ее ранении

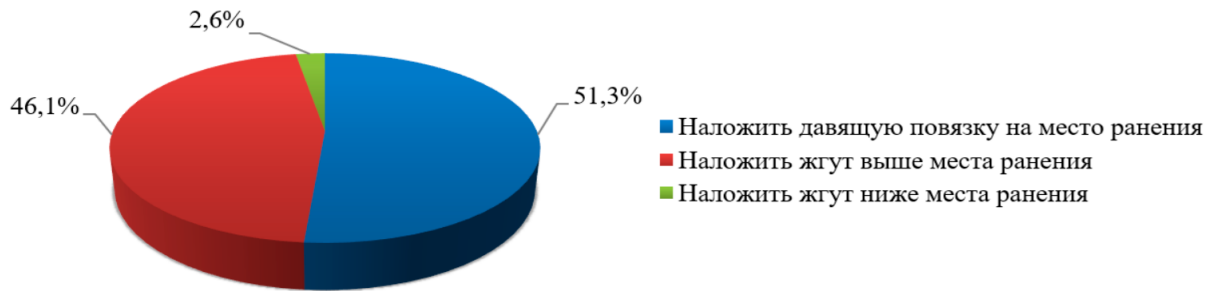


Рисунок 9. – Уровень сформированности компетенций респондентов по оказанию первой помощи при ранении вены и некрупных артерий

Навыками определения случаев извлечения пострадавшего из салона автомобиля владеет 43,4 % опрошенных (рис. 10). Большинство респондентов (77,6 %) знает алгоритм оказания первой помощи при открытом переломе конечности, сопровождающемся кровотечением (рис. 11).



Рисунок 10. – Уровень сформированности компетенций респондентов по определению случаев извлечения пострадавшего из салона автомобиля



Рисунок 11. – Уровень сформированности компетенций респондентов согласно алгоритму оказания первой помощи при открытом переломе конечности, сопровождающемся кровотечением

Заключение

Результаты пилотажного исследования показали, что большинство респондентов (73,7 %) не проходили обучение методам оказания первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека, однако 100 % респондентов хотели бы пройти обучение. Получение респондентами информации о методах оказания первой помощи из большого числа источников не является гарантом их уверенности в знаниях, что подтверждается данными пилотажного исследования, указывающими на препятствия, возникающие у респондентов при оказании первой помощи (недостаточный уровень подготовки по первой помощи (27,3 %) и боязнь неправильного оказания первой помощи (25,9 %)). Высокий уровень информированности о методах оказания первой помощи (60,5 %) напрямую связан с обучением в учреждениях образования и специализированным обучением респондентов. Большинство опрошенных (85,1 %) указали основные номера вызова скорой медицинской помощи. При этом 14,9 % ответивших приводили, наряду с корректным, некорректный номер. Анализ уровня сформированности компетенций по оказанию

первой помощи при состояниях, представляющих угрозу для жизни и (или) здоровья человека, показал, что алгоритм проведения сердечно-легочной реанимации является проблемной областью даже на уровне знаний. Низкий уровень правильных ответов (навыками оказания первой помощи при потере сознания владеет 31,6 % опрошенных, навыками проведения сердечно-легочной реанимации – 27,6 %) в пилотажном исследовании соотносится с данными других исследований [3].

Результаты пилотажного исследования представляют практическую ценность для организации и реализации полномасштабного социологического исследования, направленного на совершенствование принципов, подходов, средств обучения и методик преподавания слушателям Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», обучающимся по образовательной программе повышения квалификации руководящих работников и специалистов в области защиты населения территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и образовательной программе обучающего курса для руководящего состава сил государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и гражданской обороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станишевский, А.Л. Готовность населения к оказанию первой помощи. Обзор литературы / А.Л. Станишевский // От истоков к достижениям XXI века: сб. науч. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посв. 90-летию БелМАПО, Минск, 7–8 окт. 2021 г. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь, Белорус. мед. акад. последипломн. образования; редкол.: А.Н. Чуканов [и др.]. – Минск: БелМАПО, 2021. – С. 621–627.
2. Биркун, А.А. Общественное мнение по вопросам обучения населения основам сердечно-легочной реанимации: опрос жителей Крымского полуострова / А.А. Биркун, Е.А. Косова // Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». – 2018. – Т. 7, № 4. – С. 311–318. – DOI: 10.23934/2223-9022-2018-7-4-311-318. – EDN: YTUDMD.
3. Богдан, И.В. Знания и практический опыт населения в вопросах оказания первой помощи / И.В. Богдан, М.В. Гурылина, Д.П. Чистякова // Здравоохранение Российской Федерации. – 2020. – Т. 64, № 5. – С. 253–257. – DOI: 10.46563/0044-197X-2020-64-5-253-257. – EDN: NGAJZY.
4. Bánfai, B. ‘The (second) year of first aid’: a 15-month follow-up after a 3-day first aid programme / B. Bánfai, A. Pandur, B. Schiszler [et al.] // Emergency Medicine Journal. – 2019. – Vol. 36, № 11. – P. 666–669. – DOI: 10.1136/emered-2018-208110.
5. Kissani, N. Knowledge, attitude and traditional practices towards epilepsy among relatives of PWE (patients with epilepsy) in Marrakesh, Morocco / N. Kissani, M. Moro, S. Arib // Epilepsy & Behavior. – 2020. – Vol. 111. – Article 107257. – DOI: 10.1016/j.yebeh.2020.107257.
6. Mahmood, M.A. Inadequate knowledge about snakebite envenoming symptoms and application of harmful first aid methods in the community in high snakebite incidence areas of Myanmar / M.A. Mahmood, D. Halliday, R. Cumming [et al.] // PLOS Neglected Tropical Diseases. – 2019. – Vol. 13, № 2. – Article e0007171. – DOI: 10.1371/journal.pntd.0007171.
7. Попов, А.В. Отсутствие навыков первой помощи как фактор высокой смертности при ДТП в Российской Федерации / А.В. Попов, У.М. Каймакова, Н.П. Стецкий [и др.] // Здоровье населения и среда обитания. – 2020. – № 4. – С. 43–47. – DOI: 10.35627/2219-5238/2020-325-4-43-47. – EDN: SIPFSE.

**Оценка уровня сформированности компетенций по оказанию первой помощи
у руководителей и работников органов и организаций**

**Assessing the level of development of first aid competencies among managers
and employees of agencies and organizations**

Маршалко Ольга Владимировна

кандидат медицинских наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
управления защитой от чрезвычайных
ситуаций, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск

Email: marshalko73@gmail.com

SPIN-код: 7720-8060

Olga V. Marshalko

PhD in Medical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Management,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk

Email: marshalko73@gmail.com

ORCID: 0009-0007-2252-9748

Панасевич Валерий Александрович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
управления защитой от чрезвычайных
ситуаций, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск

Email: panasev.valer.71@mail.ru

SPIN-код: 9424-2120

Valery A. Panasevich

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Management,
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk

Email: panasev.valer.71@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5469-1455

Цинкевич Ольга Ивановна

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
управления защитой от чрезвычайных
ситуаций, старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск

Email: cinkevich@mail.ru

Olga I. Tsinkevich

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Emergency Management,
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk

Email: cinkevich@mail.ru

ORCID: 0009-0000-8729-8978

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-4.472>

EDN: <https://elibrary.ru/ZFAWKU>

ASSESSING THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF FIRST AID COMPETENCIES AMONG MANAGERS AND EMPLOYEES OF AGENCIES AND ORGANIZATIONS

Marshalko O.V., Panasevich V.A., Tsinkevich O.I.

Purpose. Study of the level of development of first aid competencies among managers and employees of agencies and organizations.

Methods. Pilot study «Assessment of the level of development of first aid competencies among managers and employees of agencies and organizations» (pilot study) using the sociological method of online survey Computer Assisted WEB Interviewing (CAWI) and subsequent analysis of the results using the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS).

Findings. The results of the pilot study showed that listeners of the State Educational Establishment «University of Civil Defense of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», studying under the advanced training program in the field of population and territory protection from natural and man-made emergencies, expressed an active interest in learning first aid methods. Among the obstacles to providing first aid, respondents noted an insufficient level of training in first aid (27.3 %) and fear of improper first aid (25.9 %). Respondents who claimed to know all first aid methods (36.8 %) more often received information by taking specialized courses. Analysis of the level of development of competencies in providing first aid in conditions that pose a threat to human life and (or) health showed that the algorithm for performing cardiopulmonary resuscitation is a problem area even at the theoretical knowledge level.

Application field of research. The results of the pilot study will be used to conduct a full-scale sociological study aimed at improving the principles, approaches, teaching aids and methods of teaching medical protection of the population to listeners of the State Educational Establishment «University of Civil Defense of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus».

Keywords: first aid delivery, pilot study, level of competence development, managers and employees, emergency situations.

(The date of submitting: October 8, 2024)

REFERENCES

1. Stanishvskiy A.L. Gotovnost' naseleniya k okazaniyu pervoy pomoshchi. Obzor literatury [Population readiness to provide first aid. Literature review]. *Proc. of Scientific-practical conf. with international participation, dedicated to the 90th anniversary of Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education «Ot istokov k dostizheniyam XXI veka [From the origins to the achievements of the 21st century]»*, Minsk, October 7–8, 2021. Minsk: BelMAPE, 2021. Pp. 621–627. (rus)
2. Birkun A.A., Kosova Y.A. Public opinion on community basic cardiopulmonary resuscitation training: a survey of inhabitants of the Crimean Peninsula. *Russian Sklifosovsky Journal «Emergency Medical Care»*, 2018. Vol. 7, No. 4. Pp. 311–318. DOI: 10.23934/2223-9022-2018-7-4-311-318. EDN: YTUDMD.
3. Bogdan I.V., Gurylina M.V., Chistyakova D.P. Znaniya i prakticheskiy opyt naseleniya v voprosakh okazaniya pervoy pomoshchi [Knowledge and practical experience of the population in providing first aid]. *Health care of the Russian Federation*, 2020. Vol. 64, No. 5. Pp. 253–257. (rus). DOI: 10.46563/0044-197X-2020-64-5-253-257. EDN: NGAJZY.
4. Bánfai B., Pandur A., Schiszler B., Pek E., Radnai, B., Csonka H., Betlehem J. 'The (second) year of first aid': a 15-month follow-up after a 3-day first aid programme. *Emergency Medicine Journal*, 2019. Vol. 36, No. 11. Pp. 666–669. DOI: 10.1136/emmermed-2018-208110.
5. Kissani N., Moro M., Arib S. Knowledge, attitude and traditional practices towards epilepsy among relatives of PWE (patients with epilepsy) in Marrakesh, Morocco. *Epilepsy & Behavior*, 2020. Vol. 111. Article 107257. DOI: 10.1016/j.yebeh.2020.107257.
6. Mahmood M.A., Halliday D., Cumming R., Thwin K.T., Myitzu M., White J. et al. Inadequate knowledge about snakebite envenoming symptoms and application of harmful first aid methods in the community in high snakebite incidence areas of Myanmar. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 2019. Vol. 13, No. 2. Article e0007171. DOI: 10.1371/journal.pntd.0007171.
7. Popov A.V., Kaymakova U.M., Stetskiy N.P., Rebro I.V., Mustafina D.A. Otsutstvie navykov pervoy pomoshchi kak faktor vysokoy smertnosti pri DTP v Rossiyskoy Federatsii [The lack of first aid skills as a contributing factor of high road traffic fatality rates in the Russian Federation]. *Public Health and Life Environment – PH&LE*, 2020. No. 4. Pp. 43–47. (rus). DOI: 10.35627/2219-5238/2020-325-4-43-47. EDN: SIPFSE.

Copyright © 2024 Marshalko O.V., Panasevich V.A., Tsinkevich O.I.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

**ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
статей для публикации в научном журнале
«Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси»**

1. Направляемые в Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси статьи должны представлять результаты научных исследований и испытаний, описания технических устройств и программно-информационных продуктов, проблемные обзоры, краткие сообщения, комментарии к нормативным техническим документам, справочные материалы и т.п.

2. Объем научной статьи, учитываемой в качестве публикации по теме диссертации, должен составлять не менее 0,35 авторского листа (14 000 печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.). В этот объем входят таблицы, фотографии, графики, рисунки и список литературы.

3. Статья предоставляется в двух экземплярах. Второй экземпляр статьи должен быть постранично пронумерован и подписан всеми авторами. К рукописи статьи прилагаются: а) рекомендация кафедры, научной лаборатории или учреждения образования; б) экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати; в) подписанный лицензионный договор на право опубликования статьи (заключается с каждым автором отдельно и печатается с двух сторон на одном листе). Форма договора размещена на сайте журнала: <https://journals.ucp.by>.

4. Электронная версия статьи, подготовленная в текстовом редакторе Microsoft Word, предоставляется на стандартных носителях либо по электронной почте на адрес: vestnik@ucp.by. Рисунки прилагаются дополнительно как отдельные файлы графического формата.

5. Материал статьи излагается в следующем порядке:

1) информация об авторах (на отдельном листе): фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, ученое звание, место работы (полное название, адрес с указанием индекса и страны), должность, рабочий телефон, email (обязательно), имеющиеся персональные идентификационные номера в наукометрических базах (при этом обязательным является указание SPIN-кода РИНЦ, идентификатора ORCID). Если авторов несколько, указывается корреспондент по вопросам содержания статьи;

2) номер УДК (универсальная десятичная классификация);

3) название статьи;

4) аннотация (не менее 200 и не более 300 слов) является основным источником информации о статье, может публиковаться самостоятельно в реферативных журналах и информационных системах в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации. Аннотация должна раскрывать: *цель* (определяется круг рассматриваемых вопросов, обозначаются цель и задачи работы, объект и предмет исследования); *методы* (излагаются подходы, методы и технологии исследования); *результаты* (приводятся наиболее значимые теоретические положения, экспериментальные данные, подчеркивается их актуальность и новизна); *область применения исследований* (описываются возможности использования полученных результатов, отмечается их научно-практическая значимость);

5) ключевые слова и словосочетания статьи (не более 12 слов);

6) дата поступления статьи (месяц и год);

7) введение; основная часть статьи; заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

8) указание на источник финансирования (если статья подготовлена в рамках выполнения гранта научных исследований);

9) список цитированной литературы. Для каждого источника указывается (при наличии) его DOI. Эксперты международных наукометрических баз данных негативно воспринимают включение в список цитированной литературы источников локального характера (постановлений, законов, инструкций, неопубликованных отчетов, диссертаций, авторефератов и т.п.), электронных материалов и ресурсов сети Интернет. Поэтому ссылки на такие источники рекомендуем оформлять в виде постраничных сносок со сквозной нумерацией.

На отдельной странице на английском языке приводятся следующие сведения: информация об авторах; название статьи; аннотация, обязательно включающая следующие пункты: purpose, methods, findings, application field of research; ключевые слова и словосочетания; транслитерация на латинице и перевод на английский язык списка цитированной литературы.

Для русскоязычных источников в транслитерации на латинице приводятся фамилия, имя, отчество авторов, названия статей, журналов (если нет англоязычного названия), материалов конференций, издательств и на английском языке – названия публикаций и выходные сведения (город, том и номер издания, страницы). Для транслитерации на латиницу следует применять систему транслитерации BGN, при этом можно использовать интернет-ресурсы, например сайт: <http://translit.net>.

Основные требования к оформлению статей, предоставляемых в научный журнал, и пример оформления статьи размещены на сайте издания: <https://journals.ucp.by>.

6. Содержание разделов статьи, таблицы, рисунки, цитированная литература должны отвечать требованиям межгосударственного стандарта ГОСТ 7.1-2003 и Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением ВАК Беларуси от 28 февраля 2014 г. № 3.

7. Редакция оставляет за собой право на изменения, не искажающие основного содержания статьи. Рукописи отклоненных статей авторам не возвращаются.

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
МИНИСТЕРСТВА ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»**

Факультет заочного обучения

Проводит:

Подготовку по специальностям:

6-05-1033-01 «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» с присвоением квалификации «Инженер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций». Форма обучения – заочная. Полный срок обучения – 5 лет, сокращенный – 3 года.

По окончании обучения выдается диплом о высшем образовании государственного образца.

Факультет безопасности жизнедеятельности

Проводит:

Переподготовку лиц с высшим образованием по специальностям:

9-09-1033-02 «Инжиниринг безопасности объектов строительства» с присвоением квалификации «Инженер». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

9-09-1033-03 «Промышленная безопасность» с присвоением квалификации «Инженер». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

По окончании обучения выдается диплом государственного образца о переподготовке на уровне высшего образования.

Повышение квалификации для руководящих работников и специалистов, имеющих высшее или среднее специальное образование, по образовательным программам:

- «Экспертная деятельность» (в пожарной безопасности);
- «Пожарная безопасность. Предупреждение чрезвычайных ситуаций. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны»;
- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Проектирование систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (инженерно-технические работники)»;
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах Республики Беларусь»;
- «Промышленная безопасность»;
- «Организация и обеспечение промышленной безопасности предприятий химической промышленности, хранения и переработки зерна, аммиачных и хлораторных установок»;
- «Организация и обеспечение промышленной безопасности при обращении пиротехнических изделий»;
- «Безопасность горных работ»;
- «Экспертная деятельность в промышленной безопасности»;
- «Радиационная безопасность» (при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях);
- «Радиационная безопасность» (при использовании источников ионизирующего излучения, в целях отличных от медицинских);
- «Основы обеспечения ядерной и радиационной безопасности» (для лиц, участвующих в обеспечении ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации объектов использования атомной энергии);
- «Экспертиза безопасности в области использования атомной энергии (для работников, оказывающих услуги по проведению экспертизы безопасности в области использования атомной энергии)»;
- «Проектирование пунктов хранения радиоактивных отходов» для работников, оказывающих услуги в сфере проектирования;
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Охрана труда»;
- «Защита от чрезвычайных ситуаций».

Обучающие курсы для лиц, имеющих профессионально-техническое и общее среднее образование, по образовательным программам:

- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (исполнители работ)»;
- «Защита от чрезвычайных ситуаций».

Семинары по образовательным программам:

- «Оказание первой помощи пострадавшим в ЧС»;
- «Расчет предела огнестойкости (железобетонных, металлических, деревянных, каменных строительных конструкций»;
- «Расчет времени эвакуации людей при пожаре»;
- «Расчет температурного режима пожара в помещении»;
- «Расчет величины противопожарных разрывов между зданиями, сооружениями и наружными установками»;
- «Расчет площади легкосбрасываемых конструкций»;
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Порядок проектирования пассивной противопожарной защиты зданий различного назначения»;
- «Оптимизация затрат на обеспечение требований пожарной безопасности на основании расчетных методов»;
- «Охрана труда в организациях непромышленной сферы».

Подготовку лиц к поступлению в учреждения образования Республики Беларусь по учебным предметам: математика, физика, русский язык, русский язык как иностранный, белорусский язык, английский язык, немецкий язык, французский язык, история, обществоведение, химия (очная/дистанционная форма обучения).

Обучение проводит профессорско-преподавательский состав университета и ведущие специалисты Республики Беларусь в области пожарной и промышленной безопасности.

Наш адрес: 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25,
ФЗО: тел/факс +37517 340-71-89,
ФБЖ: тел. +37517 340-69-55, факс +37517 340-35-58, email: fpipk@ucp.by.

Дополнительная информация размещена на сайте университета: <http://ucp.by>
в разделе «Повышение квалификации»

Научный журнал

Вестник
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси
Том 8, № 4, 2024

Подписано в печать 22.11.2024.
Формат 60×84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 11,55. Уч.-изд. л. 10,25.
Тираж 35 экз. Заказ 082-2024.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/259 от 14.10.2016.
Ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск.