



Основан в 2016 году

Выходит 4 раза в год

Научный журнал
Вестник
Университета гражданской защиты
МЧС Беларуси
(Journal of Civil Protection)
Том 10, № 1, 2026

Редакционная коллегия:

главный редактор:

Полевода

Иван Иванович

доктор технических наук,
профессор

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); Батуро Алексей Николаевич, кандидат технических наук (Россия); Бирюк Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Бордак Сергей Сергеевич, кандидат военных наук, доцент; 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; Карпиленя 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; Усеня Владимир Владимирович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик НАН Беларуси; Федюк Роман Сергеевич, доктор технических наук, профессор (Россия); 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

Подписной индекс в РУП «Белпочта»: 00136 (индивидуальная подписка),
001362 (ведомственная подписка).

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», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Пожаробезопасность и взрывозащита зданий и сооружений. Огнестойкость строительных материалов

Полевода И.И., Чорный А.Д., Тетерюков А.В. Моделирование пожара при горении скатных крыш 5

Нехань Д.С., Левданский А.А. Инженерная методика расчета температурного поля в поперечном сечении многопустотных железобетонных плит при стандартном пожаре 24

Аварийно-спасательная техника, оборудование и экипировка. Тренажерная техника

Лахвич В.В., Морозов А.А., Козлов Е.А., Шатилов Ю.С., Аниськов В.И. Влияние различных условий эксплуатации дыхательного аппарата со сжатым воздухом на стабильность работы легочного автомата 41

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

Камлюк А.Н., Лихоманов А.О., Гараев Ю.В., Вашкевич Д.А. Математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, получаемой в устройствах с сетками 53

Рева О.В., Криваль Д.В., Дечко М.М., Дьячкова Л.Н. Многофакторная модель оптимизации состава комплексного замедлителя горения для полиамида-6 65

Технологии и программное обеспечение в сфере предупреждения и ликвидации ЧС, промышленной и пожарной безопасности

Камлюк А.Н. Комплексная методика оценки эффективности тушения пожаров пеной по коэффициентам качества тушения и экономической целесообразности 87

Шамсудинов Г.Ю., Морозов В.В., Широков Г.С., Яровой В.Ю., Михайлова А.К. Нейросетевой помощник для автоматизированной диагностики и поддержки оказания первой помощи при повреждении глаз и кожи в чрезвычайных ситуациях 107

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

Смиловенко О.О., Мартыненко Т.М., Лосик С.А., Полуян А.И., Казутин Е.Г. Работоспособность болтовых соединений в крепежных узлах опорно-поворотного устройства подъемных кранов 118

Психологические аспекты предупреждения и ликвидации ЧС

Тарасевич Т.Н. Эмоциональное выгорание спасателей-пожарных 134

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

Суриков А.В., Зайнудинова Н.В., Довнар Т.А., Жолнерчик В.В. Педагогическая концепция создания системы интерактивных имитационных тренажеров по осуществлению надзорно-профилактической деятельности в области пожарной безопасности 145

Правила предоставления статей 158

CONTENTS

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

Palevoda I.I., Chorny A.D., Teteryukov A.V. Fire modeling of pitched roof combustion 5

Nekhan' D.S., Levdanskiy A.A. Engineering method for calculating the temperature field in the cross-section of hollow-core reinforced concrete slabs under a standard fire 24

Emergency rescue techniques, equipment and outfit. Training equipment

Lakhvich V.V., Morozov A.A., Kozlov E.A., Shatilov Yu.S., Anis'kov V.A. Influence of various operating conditions of a compressed air breathing apparatus on the stability of the lung demand valve 41

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

Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V., Vashkevich D.A. Mathematical model for predicting the expansion rate of fire extinguishing foam produced in devices with meshes 53

Reva O.V., Krival' D.V., Dechko M.M., D'yachkova L.N. Multifactor model for optimizing the composition of a complex flame retardant for polyamide-6 65

Technologies and software in the sphere of emergency prevention and elimination, industrial and fire safety

Kamlyuk A.N. A comprehensive methodology for assessing the effectiveness of fire suppression with foam based on the quality of fire suppression and economic feasibility 87

Shamsudinov G.Yu., Morozov V.V., Shirokov G.S., Yarovoy V.Yu., Mikhaylova A.K. Neural network assistant for automated diagnostics and first aid support for eye and skin injuries in emergency situations 107

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

Smilovenko O.O., Martynenko T.M., Losik S.A., Poluyan A.I., Kazutin E.G. Bolting operability in fasteners of tilting support device cranes 118

Psychological aspects of emergency prevention and elimination

Tarasevich T.N. Emotional burnout among firefighters 134

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

Surikov A.V., Zaynudinova N.V., Dovnar T.A., Zholnerchik V.V. Pedagogical concept for the development of a system of interactive simulation trainers for implementing supervisory and preventive activities in the field of fire safety 145

Rules of submitting articles for publication 158

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА ПРИ ГОРЕНИИ СКАТНЫХ КРЫШ**Полевода И.И., Чорный А.Д., Тетерюков А.В.**

Цель. Разработать физико-математическую модель и определить закономерности теплового и газодинамического взаимодействия при горении скатных крыш, выполненных из горючих строительных материалов, с применением методов вычислительной гидродинамики. Рассмотреть процессы формирования конвективных и радиационных потоков для дальнейшего уточнения геометрических параметров излучающей поверхности и оценки теплового воздействия на соседние здания и сооружения.

Методы. Численное моделирование горения скатных крыш в программной среде ANSYS Fluent 2022 R2. Расчеты выполнены на основе решения осредненных уравнений Рейнольдса с применением модели SST $k-\omega$ турбулентности, модели турбулентного горения с учетом модели диссипации вихря, метода дискретных ординат для радиационного теплообмена, модели пиролиза кровельных материалов и одношаговой модели сажеобразования. Граничные условия заданы на основе ранее проведенных экспериментальных исследований.

Результаты. Получены пространственно-временные распределения температурных полей, интенсивности тепловых потоков при горении скатных крыш. По результатам численного моделирования в программной среде Ansys Fluent установлено, что при горении крыши на расстоянии 1 м по горизонтали и 1 м по вертикали от фронтона и ската крыши значения температур лежат в интервале от 530 до 590 К, а плотность теплового потока составляет от 4,5 до 8,0 кВт/м². Полученные данные согласуются с результатами экспериментальных исследований, подтверждая достоверность модели. Комплексно исследованы процессы пиролиза, турбулентного горения, лучистого теплообмена и сажеобразования при моделировании горения скатных крыш.

Область применения исследований. Определение величины противопожарных разрывов между зданиями с крышами, выполненными из горючих материалов. Полученные данные могут быть использованы при совершенствовании инженерных методик и нормативных правовых актов по пожарной безопасности, а также представляют практический интерес для проектных институтов, сотрудников МЧС и научно-образовательных учреждений.

Ключевые слова: противопожарный разрыв, горение крыш, численное моделирование, тепломассоперенос, плотность теплового потока, вычислительная гидродинамика.

(Поступила в редакцию 12 января 2026 г.)

Введение

Анализ пожаров, вызванных несоблюдением противопожарных разрывов [1], показал, что наибольшее количество пожаров происходит в зданиях класса Ф1.4 – многоквартирные, блокированные жилые дома и агроусадьбы. Данные здания и сооружения в основном возведены с применением горючих строительных материалов как в несущих и ограждающих конструкциях (стены, крыша), так и в элементах наружной отделки.

В существующих расчетных методиках по определению противопожарных разрывов между зданиями с крышами, выполненными из горючих материалов [2, с. 317–341; 3, с. 179–194; 4, с. 27–39; 5, с. 53–74; 6, с. 171–184; 7, с. 9–14], геометрические параметры крыши и, соответственно, излучающей поверхности при ее горении учитываются в упрощенном виде, что существенно влияет на точность оценки теплового воздействия на соседние здания и сооружения. При этом детальные исследования по определению геометрических параметров излучающей поверхности проводились для случаев горения различных объектов [8–11]. Исследования [8] направлены на разработку методики оценки противопожарных разрывов между автомобилями и обоснования безопасного размещения автомобилей на стоянках. В результате получены экспериментальные данные о пожарной опасности автомобиля и геометрических параметрах излучающей поверхности при воздействии на него теплового излучения от модельных очагов пожара, разработан проект рекомендаций по нормированию противопожарных разрывов между автомобилями [8].

В работе [9] разработана методика расчета температурного поля горизонтального резервуара с нефтепродуктом при воздействии на него тепловых потоков от модельных очагов

пожара. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель и программное обеспечение по определению нестационарного температурного поля горизонтального резервуара с нефтепродуктом, позволяющее определять противопожарные разрывы и прогнозировать пожароопасные ситуации на нефтегазовых объектах [9].

Исследования [10] направлены на определение геометрических параметров пламени горящей пожарной нагрузки в виде островковой торговли в объеме многосветного помещения (атриума). Разработан алгоритм для определения ширины такого помещения, препятствующей распространению пожара из одной части здания в другую при нахождении в нем пожарной нагрузки [10].

В [11] определены пространственно-временные параметры противопожарных барьеров, включающих распределение лучистого теплового потока от протяженных фронтов пламени и воспламеняемость наземного горючего материала лесных насаждений. Полученная методика [11] позволяет определять величину противопожарного разрыва и время его защитного действия, обеспечивая надежную защиту лесного массива от низовых пожаров, в том числе в условиях аномально засушливой погоды. Можно отметить, что детальных исследований по определению геометрических параметров излучающей поверхности при горении крыш, выполненных из горючих материалов, не проводилось [12].

Одним из направлений исследований является проведение натуральных огневых испытаний для получения экспериментальных данных с целью модернизации существующих методик СН 2.02.05-2020¹, СН 2.01.03-2019² и СТБ 11.05.03-2010³ по оценке противопожарных разрывов между зданиями с крышами, выполненными из горючих материалов, в части определения геометрических параметров излучающей поверхности.

Одним из проблемных вопросов при расчете противопожарных разрывов между индивидуальными жилыми домами является определение углового коэффициента облученности от двускатной крыши, выполненной из горючих материалов. По методикам [2, с. 317–341; 3, с. 179–194; 6, с. 171–184; 7, с. 9–14] возможно определить данный параметр, принимая излучающую поверхность только в качестве прямоугольника, при этом ширина пламени принимается равной длине фасада, а высота – как геометрическая высота здания до конька крыши. Указанное допущение значительно увеличивает расчетную площадь излучающей поверхности. Для решения данного вопроса была разработана универсальная аналитическая модель расчета углового коэффициента облученности для многоугольных излучающих поверхностей, расположенных под произвольным углом к принимающей поверхности [13; 14].

Для уточнения форм и геометрических размеров излучающих поверхностей в работе [12] проведены натурные экспериментальные исследования. При горении экспериментального фрагмента двускатной крыши, выполненной из горючих материалов, посредством тепловизионной съемки установлено, что излучающая поверхность от фронтона двускатной крыши (размерами в плане 1,5×3 м) имеет форму треугольника, высота которого превышает значение высоты фронтона экспериментального фрагмента.

Целью настоящей работы является разработка физико-математической модели и расчет нестационарного конвективного и радиационного теплопереноса при горении крыши с последующей оценкой динамики распределения газодинамических и тепловых характеристик продуктов сгорания в пространстве, окружающем крышу, выполненную из горючих материалов.

Основная часть

Постановка задачи и методика исследования. В практике обеспечения пожарной безопасности зданий применяются три основных метода определения противопожарных разрывов: табличный, аналитический (инженерный) [15] и методы численного моделирования (полевой метод моделирования пожаров) [16; 17]. Метод численного моделирования, как

¹ Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020. – Взамен СН 2.02.01-2019 (с отменой ТКП 45-2.02-315-2018 (33020)); введ. 04.04.2021. – Мн.: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – IV, 70 с.

² Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Введ. 15.06.2020 (с отменой ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250)). – Мн.: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – IV, 43 с.

³ Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03-2010. – Взамен СТБ П 11.05.03-2006; введ. 01.01.2011. – Мн.: Бел. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2010. – III, 76 с.

правило, применяется для сложных объектов или плотной застройки и предполагает использование программных комплексов (например, FDS, Ansys и др.), позволяющих моделировать развитие пожара и тепловое воздействие на соседние здания и сооружения. Примеры использования данного подхода изложены в работах [18; 19].

Как указано выше, для определения характера изменения температуры и тепловых потоков на различном расстоянии от крыши при ее горении требуется определение газодинамического и теплового состояния газовой среды при ее движении в пространстве, ограниченном расчетной областью. В рамках подходов вычислительной гидрогазодинамики для расчета использовалась модель тепломассопереноса при горении [1]. Алгоритм расчета горения крыши, выполненной из горючих материалов, строится на общем алгоритме, представленном на рисунке 1. Он включает модель реагирующего потока газовой смеси с использованием модели турбулентности [1; 17, с. 12–16; 20; 21, с. 28–31] и одношаговую эмпирическую модель сажеобразования [21, с. 40–41; 22]. Соответствующие уравнения могут быть представлены как:

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0; \quad (1)$$

– уравнение движения

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right) + \rho g_i; \quad (2)$$

– уравнение кинетической энергии турбулентности k

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* \rho \omega k; \quad (3)$$

– уравнение удельной скорости диссипации ω

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; \quad (4)$$

– уравнение энергии в терминах тепловой энтальпии h

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j}; \quad (5)$$

– уравнение для концентрации компонентов газа Y_l

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_l) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_l) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_l}{\partial x_j} \right) + S_l; \quad (6)$$

– уравнение для концентрации сажи S

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_s) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_s}{\partial x_j} \right) + S_s, \quad (7)$$

где ρ – осредненная плотность, кг/м³;

t – время, с;

x_j – декартовы координаты 3-мерного пространства ($j = 1..3$), м;

u_i – компонента осредненной скорости ($i = 1..3$), м/с;

μ и μ_t – динамическая и турбулентная вязкость, Па·с;

δ_{ij} – символ Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$);

k – удельная кинетическая энергия турбулентности (КЭТ), м²/с²;

g_i – координаты вектора ускорения свободного падения, м/с²;

ω – удельная скорость диссипации КЭТ (частота турбулентности), с⁻¹;

h – удельная энтальпия, Дж/кг. Выражается через концентрации компонентов газовой смеси Y_l и энтальпии каждого из компонентов $h = \sum_{l=1}^N Y_l \left(h_l^0 + \int_{T_0}^T c_{p,l}(T) dT \right)$;

Y_l – концентрации компонентов газа ($l = 1..N$), кг/м³;

h_l^0 – энтальпия компонентов газа при температуре T_0 , Дж/кг;

T_0 – температура окружающей среды, К;

T – температура газа, К;

$c_{p,l}$ – изобарная теплоемкость компонентов смеси, Дж/(кг К);

q_j^R – плотность теплового потока за счет лучистого теплопереноса, Вт/м²;

Y_S – концентрация сажи;

S_l и S_S – осредненные скорости химических реакций образования продуктов сгорания и сажи, кг/(м³·с);

p – осредненное статическое давление, Па;

Pr , Sc и Pr_t , Sc_t – молекулярные и турбулентные числа Прандтля и Шмидта соответственно. Молекулярная динамическая и турбулентная вязкости μ и μ_t (Па·с), генерация турбулентной энергии P_k (кг/(м·с³)), эмпирические константы σ_k и σ_ω , и эмпирические безразмерные константы и функции смешения SST k - ω модели Ментера β^* , β , γ , σ_ω , F_1 детально описаны в работе [1] согласно [20].

Система уравнений дополнена уравнением состояния газа, формула:

$$p = R\rho T \sum_{l=1}^N Y_l / M_l, \quad (8)$$

где $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

M_l – молярная масса газовых компонентов, кг/моль.

Плотность теплового потока за счет лучистого теплопереноса q_j^R (Вт/м²) определяется с помощью модели излучения (модель дискретных ординат [23; 24, с. 243–249; 25]), которая используется с учетом влияния концентрации сажи на лучистый теплоперенос. Уравнение переноса интенсивности излучения I_n в направлении n [24, с. 231] записывается следующим образом:

$$\vec{s}_n \cdot \nabla I_n = \kappa_{\text{общ}} (I_b - I_n), \quad (9)$$

где \vec{s}_n – единичный вектор направления n ;

I_n – интенсивность излучения, Вт/м²;

$\kappa_{\text{общ}} = \kappa_g + \kappa_s$ – суммарный коэффициент поглощения;

κ_g – коэффициент поглощения газом, может рассчитываться по модели WSGGM (Weighted Sum of Gray Gases Model) [24, с. 223–227] или вычисляться по формуле [26]:

$$\kappa_g = 0,32 + 0,28 \exp(-T / 1135);$$

$\kappa_s = 3,83 f_v C_0 T / C_2$ – коэффициент поглощения сажей;

C_0 – эмпирическая константа (принятая равной 5,0);

$C_2 = 0,014388$ м·К – вторая постоянная Планка;

$f_v = \rho Y_s / \rho_s$ – доля сажи;

ρ_s – плотность сажи (~2000 кг/м³) [26].

$I_b = \sigma T^4 / \pi$ – интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/м²;

σ – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/м²·К⁴.

Тогда согласно [23; 24, с. 232], учитывая, что $\vec{q}^R = \iint_{\Omega} I(\vec{s}) \vec{s} d\Omega \approx \sum_{n=1}^M I_n \vec{s}_n w_n$, дивергенция теплового потока в уравнении для энтальпии определяется как [24, с. 249]:

$$\begin{aligned} \nabla \vec{q}^R &= \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j} \stackrel{(9),(10)}{=} \iint_{\Omega} \kappa_{\text{общ}} (I_b - I_n) d\Omega = \kappa_{\text{общ}} \left(\int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_b \sin \theta d\theta d\varphi - \iint_{\Omega} I_n d\Omega \right) = \\ &= \kappa_{\text{общ}} (4\pi I_b - G) = \kappa_{\text{общ}} (4\sigma T^4 - G), \end{aligned} \quad (10)$$

где $G = \sum_{n=1}^M I_n w_n$ – падающее излучение, просуммированное по всем направлениям.

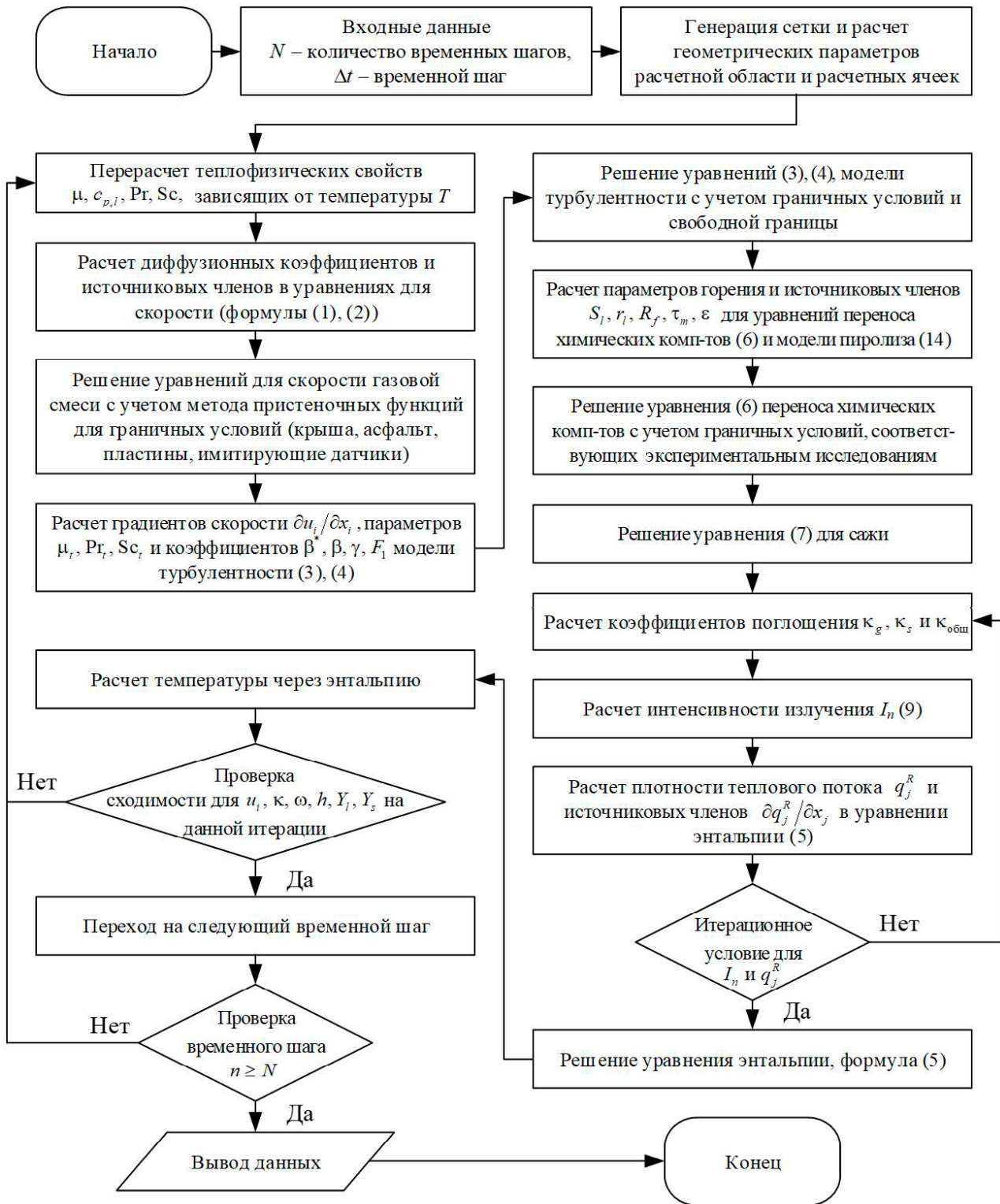


Рисунок 1. – Алгоритм расчета пожара на основе модели тепломассопереноса при горении горючих материалов с учетом пиролиза, лучистого теплообмена, сажеобразования, поглощения и рассеяния излучения образованной сажей

При предположении одностадийной бесконечно быстрой необратимой химической реакции между горючим компонентом и окислителем при турбулентном горении источниковые члены S_i (кг/(м³ с)) учитываются через модель диссипации вихря EDM (Eddy Dissipation Model) [21; 22] как:

$$S_i = -r_i R_f, \quad (11)$$

где r_i – стехиометрический коэффициент компонентов газовой смеси;

R_f – скорость выгорания горючего компонента, кг/(м³·с).

Скорость выгорания ограничивается процессом турбулентного перемешивания реагентов и определяется величиной, обратно пропорциональной временному масштабу смешения $\tau_m = k/\varepsilon$ [21, с. 37; 22]:

$$R_f = \rho \frac{C_R}{\tau_m} \min(Y_1, Y_2 / r_2), \quad (12)$$

где $\varepsilon = \beta^* \omega k$ – скорость диссипации КЭТ, м²/с³;

$C_R = 4$ – эмпирическая константа модели диссипации вихря;

Y_1 и Y_2 – концентрации горючего компонента и окислителя соответственно;

r_2 – стехиометрическое отношение окислителя к топливу по массе.

В то же время в одношаговой модели сажеобразования [21, с. 40–41; 22; 27, с. 272–273] осредненная скорость химической реакции образования сажи S_S (кг/(м³·с)) определяется как:

$$S_S = R_S^+ + R_S^-, \quad (13)$$

где $R_S^+ = C_S P_f \frac{r_2 Y_1}{Y_2} \exp(-E_S / (RT))$ – скорость образования сажи, кг/(м³·с);

$R_S^- = -\rho \frac{C_R}{\tau_m} Y_S \frac{Y_2}{r_S Y_S + Y_1}$ – скорость окисления сажи, кг/(м³·с);

C_S – константа образования сажи [27, с. 273], с/м²;

P_f – парциальное давление горючего компонента, Па;

E_S – энергия активации сажи [27, с. 273], Дж/моль;

r_S – стехиометрический коэффициент сажи.

Дополнительной отличительной особенностью алгоритма, приведенного на рисунке 1, от алгоритма, представленного в [1], является необходимость привлечения модели пиролиза материалов крыши для постановки граничных условий на ее поверхности [25; 28]. Для расчета пиролиза материалов крыши использовался подход, аналогичный представленному в работе [29]. Тепловой поток проводится через материал крыши, который выделяет летучие вещества. Предполагается, что все летучие вещества уходят с поверхности сразу после их образования.

Представленная выше система уравнений лежит в основе алгоритма, приведенного на рисунке 1, который включает последовательно расчет газодинамики с учетом турбулентности, химического реагирования (горение, пиролиз, сажеобразование) через итерационный процесс определения лучистого теплопереноса с влиянием сажи к расчету энтальпии и температурного распределения. Данный алгоритм использован при моделировании с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent 2022 R2, обладающего возможностью реализации пользовательских функций, что обеспечивает включение дополнительных подмоделей, выходящих за рамки встроенных моделей, представленных по умолчанию.

Моделирование горения скатных крыш. Для определения интенсивности теплового потока и распределения температурных полей в прилегающей к крыше области рассматриваются две зоны горения: зона горения (скатная крыша) как часть пространства, в котором происходит горение; зона теплового воздействия (окружающая среда вокруг крыши) – пространство, примыкающее к зоне горения, в котором происходят процессы теплопереноса за счет перемещения нагретых продуктов сгорания и воздуха окружающей среды.

Согласно указанным зонам горения формируется расчетная область, представленная на рисунке 2 и ограниченная сверху свободной границей (красный цвет), снизу (синий цвет) – поверхностью земли и установленной на ней крышей согласно требованиям методики экспериментальных исследований [12].

Поскольку экспериментальные исследования проводились при условии отсутствия рядом расположенных элементов застройки или других объектов, загромождающих окружающее пространство, размеры расчетной области выбирались из требований реализации условия нахождения крыши в полуограниченном пространстве. При ширине крыши 3 м и ее высоте 1,5 м горизонтальный размер расчетной области составил 43 м, а вертикальный – 31,5 м.

В таком случае фактически имитируются условия пожара открытого типа, когда от очага пожара из-за эффекта плавучести восходят конвективные потоки с образованием конвективных колонок, интенсивность которых зависит от температуры в зоне горения.

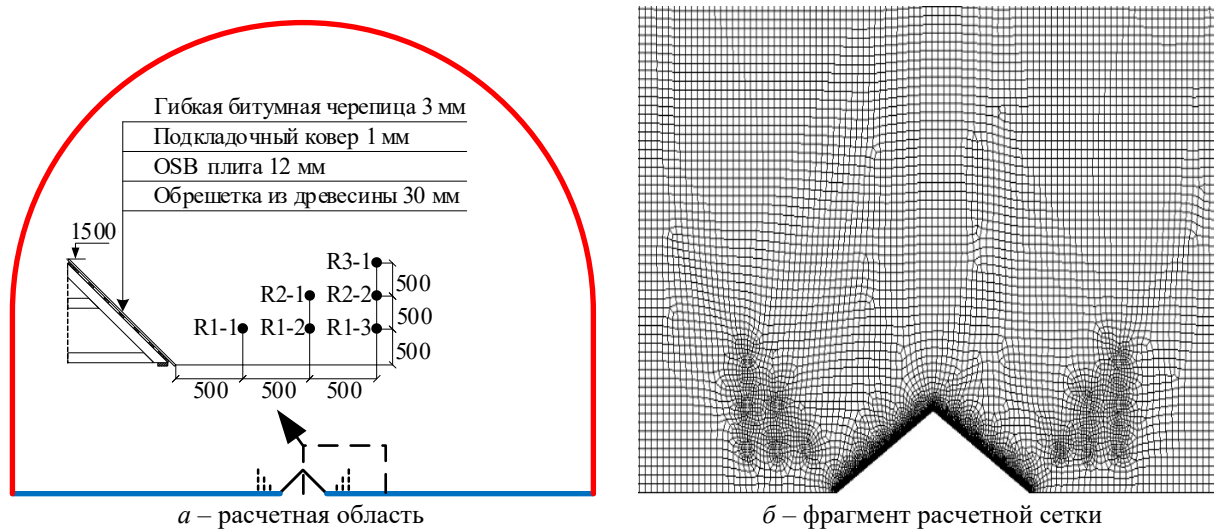


Рисунок 2. – Расчетные область и сетка, включающая крышу и окружающее ее пространство (вид спереди)

В отличие от внутреннего пожара, где поднимающиеся в конвективной колонке нагретые газы достигают горизонтальной ограждающей конструкции и растекаются по нему, образуя припотолочный слой продуктов горения высокой концентрации, в рассматриваемом случае предполагается возможность переноса продуктов сгорания за пределы свободной границы. Таким образом, принятые размеры расчетной области (рис. 2) обусловлены необходимостью имитации свободного пространства вокруг рассматриваемого объекта и для моделирования развития пожара, а также распространения продуктов сгорания, конвективного теплопереноса с минимальным влиянием ограниченности расчетной области и условий на границе. Граничные условия задавались согласно рекомендациям [16, с. 57–59; 17, с. 24–30; 21, с. 31–35, 85–89]. На ограничивающей сверху границе (красная линия на рисунке 2а) предполагалось, что избыточное давление отсутствует (справедливо при достаточно удаленной свободной границе расчетной области). Для скоростных и концентрационных характеристик ставятся граничные условия открытого типа, что позволяет задать условия возможности появления возвратного течения. На данных участках устанавливаются условия подкачки внутрь расчетной области воздуха с температурой, равной температуре окружающей среды в начальный момент времени (или далеко от очага пожара). Такое условие, кроме всего, обеспечивает подачу окислителя (воздуха) в расчетную область, устранение его полного выгорания, как это происходит при рассмотрении горения в замкнутых пространствах.

Вследствие условий безветренной погоды при проведении экспериментальных исследований [12] теплоперенос будет осуществляться при условиях, близких к естественной конвекции. В связи с этим для регистрации интенсивности тепловых потоков (конвективных, лучистых) на различном расстоянии от крыши внутри расчетной области устанавливались поверхности, имитирующие датчики, которые использовались в экспериментальных исследованиях для регистрации температуры и теплового потока [12]. На рисунке 2а приведено расположение данных поверхностей согласно эксперименту [12].

Таким образом, рассматривается нестационарная задача теплопереноса от источника тепломассовыделения в окружающую среду (воздух). В качестве очага пожара выступает поверхность крыши.

Площадь очага пожара S_f (м²) ограничена поверхностью крыши при открытом пожаре. Тогда через определенный промежуток времени величина расхода газообразных продуктов сгорания U (кг/с), поступающих в конвективную колонку, может стабилизироваться во времени. Расход газа U зависит от конвективной составляющей мощности очага пожара Q_c (МВт) [30, с. 211], определяемой из формулы:

$$q_c = Q_c / S_f = (1 - \phi) \eta Q_p \psi_{уд}, \quad (14)$$

где q_c – удельная конвективная мощность очага пожара, МВт/м²;

φ – доля теплоты, отдаваемой очагом пожара ограждающим конструкциям. При рассмотрении пожара открытого типа (горение поверхности крыши) параметр φ обычно принимается нулем [30, с. 211];

η – коэффициент полноты сгорания ($\eta = 0,85 - 0,9$);

Q_p – теплота сгорания горючих материалов, МДж/кг;

$\Psi_{уд}$ – удельная скорость выгорания, кг/(с·м²).

Моделирование производится с использованием метода конечных объемов [16, с. 59–60; 17, с. 6–7; 28]. В связи с этим расчетная область разбивалась на множество объемных сеточных ячеек конечного размера, совокупность которых представляет собой расчетную сетку с обеспечением лучшей сходимости численного метода с меньшими невязками (с лучшей точностью решения) и удовлетворения параметров сетки (скошенность ячеек, ортогональность, комфортность сетки), соответствующих лучшему ее качеству. На рисунке 2б демонстрируется разбиение расчетной области на конечные элементы (количество ячеек 129 500 шт.).

Следует отметить, что построение сетки осуществлялось по следующей процедуре. Около стенок, где наиболее интенсивно происходят процессы химического реагирования, тепловыделения, конвективного и радиационного переноса, размеры ячеек выбирались минимальными (с линейным размером 1 см) из расчета пяти ячеек в пограничном с поверхностью крыши слое окружающей газовой среды. Далее от этих ячеек строились остальные ячейки с их раздацией в свободное пространство с коэффициентом увеличения 1,2.

Для нахождения тепловых потоков и распределения температуры в точках, отстоящих от натурального фрагмента на расстояниях 0,5*i* м по горизонтали и 0,5*j* м по вертикали, $i = 1..3, j = 1..i$, от горящей крыши, моделирование производилось исходя из предположения о развитии пожара согласно нескольким стадиям [12]. Первоначально возгорание осуществляется внутри подкровельного пространства, далее происходит выгорание фронтона и прорыв пламени наружу, тогда как на поверхности крыши не наблюдается горения, а осуществляется ее нагрев. При этом, как показывают экспериментальные исследования [12], температура окружающей крышу среды остается практически неизменной относительно начальных значений. Повышение температуры на различном расстоянии от экспериментального фрагмента начинает происходить существенно после прорыва пламени на поверхность крыши и распространения пламени по всей поверхности (согласно экспериментальным исследованиям выход пламени на поверхность крыши происходил в интервале с 38-й по 42-ю мин). Таким образом, за начальную точку моделирования выбиралось именно время начала горения внешней поверхности крыши. В этом случае предполагается, что вся внешняя поверхность крыши охвачена пожаром, когда в зависимости от удельной скорости выгорания материалов крыши может быть определен расход образующейся смеси продуктов сгорания, которая перемещается от поверхности крыши в открытое пространство. С этой целью рассматривались свойства горючих материалов (табл. 1), из которых изготовлена крыша.

Принимая, что для материалов крыши известны удельная скорость выгорания $\Psi_{уд}$, нижняя теплота сгорания Q_p , полнота сгорания η , можно оценить расход образующейся смеси продуктов сгорания и тепловыделение при горении конкретных материалов крыши.

При расчете предполагалось, что при достижении температуры объема горючего материала 473 К (температура появления летучих веществ при окислении древесины) на внешней поверхности крыши начинает проходить химическая реакция с выделением тепла. Это начальная точка расчета. В объемах материалов крыши задается объемное тепловыделение, а температура рассчитывается во времени, исходя из локальных нестационарных условий в окружающей среде.

Для постановки граничных условий по тепловыделению основным параметром для расчета является удельная конвективная мощность очага пожара q_c (МВт/м²) (15). Площадь излучающей поверхности для моделирования была принята как площадь поверхности скатов крыши $S_f = 16,97$ м², объем рулонных и плитных материалов определялся согласно толщине каждого слоя кровельного пирога, для стропильной системы и обрешетки, выполненных из древесины хвойных пород, рассчитывался из геометрической модели $V_{др} = 0,795$ м³, описанной в работе [18]. Объемное тепловыделение Q_v (МВт/м³) используемых материалов рассчитывалось по формуле:

$$Q_v = q_c \cdot S_f / V_i, \quad (15)$$

где V_i – объем *i*-го материала кровельного пирога, м³.

Расход газообразных летучих компонентов, образующихся на рассматриваемых поверхностях, можно оценить из удельной скорости выгорания как:

$$U = \eta \psi_{уд} \cdot S_f. \quad (16)$$

Объемное тепловыделение Q_v и расход летучих компонентов U , необходимы для постановки граничных условий на поверхности крыши, покрытой битумной черепицей с подкладочным ковром. Расчетные параметры для моделирования пожара скатной крыши представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Свойства горючих материалов крыши

№ п/п	Материал	Теплота сгорания горючих материалов Q_p , МДж/кг	Удельная скорость выгорания $\psi_{уд}$, кг/(с·м ²)	Коэффициент полноты сгорания	Плотность материала, кг/м ³	Площадь поверхности материала, м ²	Объем материала, м ³	Объемное тепловыделение Q_v , МВт/м ³	Расход газообразных продуктов сгорания U , кг/с
1	Гибкая битумная черепица	25,0	0,024	0,85	2800,0	16,97	0,051	251,6	0,346
2	Подкладочный ковер				572,8		0,255		
3	Плита OSB	18,0	0,013	0,97	700,0		0,795	3,7	0,214
4	Древесина хвойных пород (ель)	13,8							

При моделировании предполагалось, что основными химическими реакциями являлись объемная реакция летучих компонентов древесины и кислорода, а также объемная реакция летучих компонентов битумной черепицы (вместе с подкладочным ковром) и кислорода, параметры которых взяты из внутренней базы данных Ansys Fluent. Это относится и к выбору теплофизических свойств (теплоемкость, коэффициент теплопроводности, динамический коэффициент вязкости) в зависимости от температуры для летучих компонентов битумной черепицы с подкладочным ковром и древесины.

Условием прохождения химических реакций является момент превышения локальной температуры в произвольной точке расчетной области значения 473 К. Для области крыши (битумная черепица и материалы конструкции, выполненные из древесины) это означает, что на их поверхности появляется расход U летучих компонентов в количестве, определенном выше. Если при расчете реализуется меньшая температура, то в данной точке химической реакции не происходит.

При определении параметров модели лучистого теплообмена для поверхности датчиков устанавливалось значение степени черноты, соответствующее материалу датчиков [12]. Земляной покров представлял собой асфальтированную поверхность со степенью черноты 0,93, так же как и для мягкой битумной черепицы.

Модель образования сажи имплементирована в стандартном виде одношаговой реакции. Установленные по умолчанию в Ansys Fluent константы модели справедливы для широкого круга горючих материалов (источников сажи), таких как древесина и битумная черепица.

В результате расчетов были получены распределения скорости движения газовой смеси, температуры и плотности теплового потока в пространстве около горящей крыши в различные моменты времени после охвата пожаром всей поверхности крыши – 35-я мин расчета (рис. 3–5). Для демонстрации развития пожара на рисунках также представлены результаты моделирования на 45, 50 и 55-й мин.

Как демонстрируют рисунки 3–5, динамика развития переноса продуктов горения происходит через формирование конвективной струи около очага пожара с достижением скорости 10 м/с. Далее происходит распад следового течения и расширение области, в которой присутствуют продукты сгорания. Максимальная температура реализуется около очага пожара, где происходит интенсивное тепловыделение и химическое реагирование летучих компонентов с кислородом.

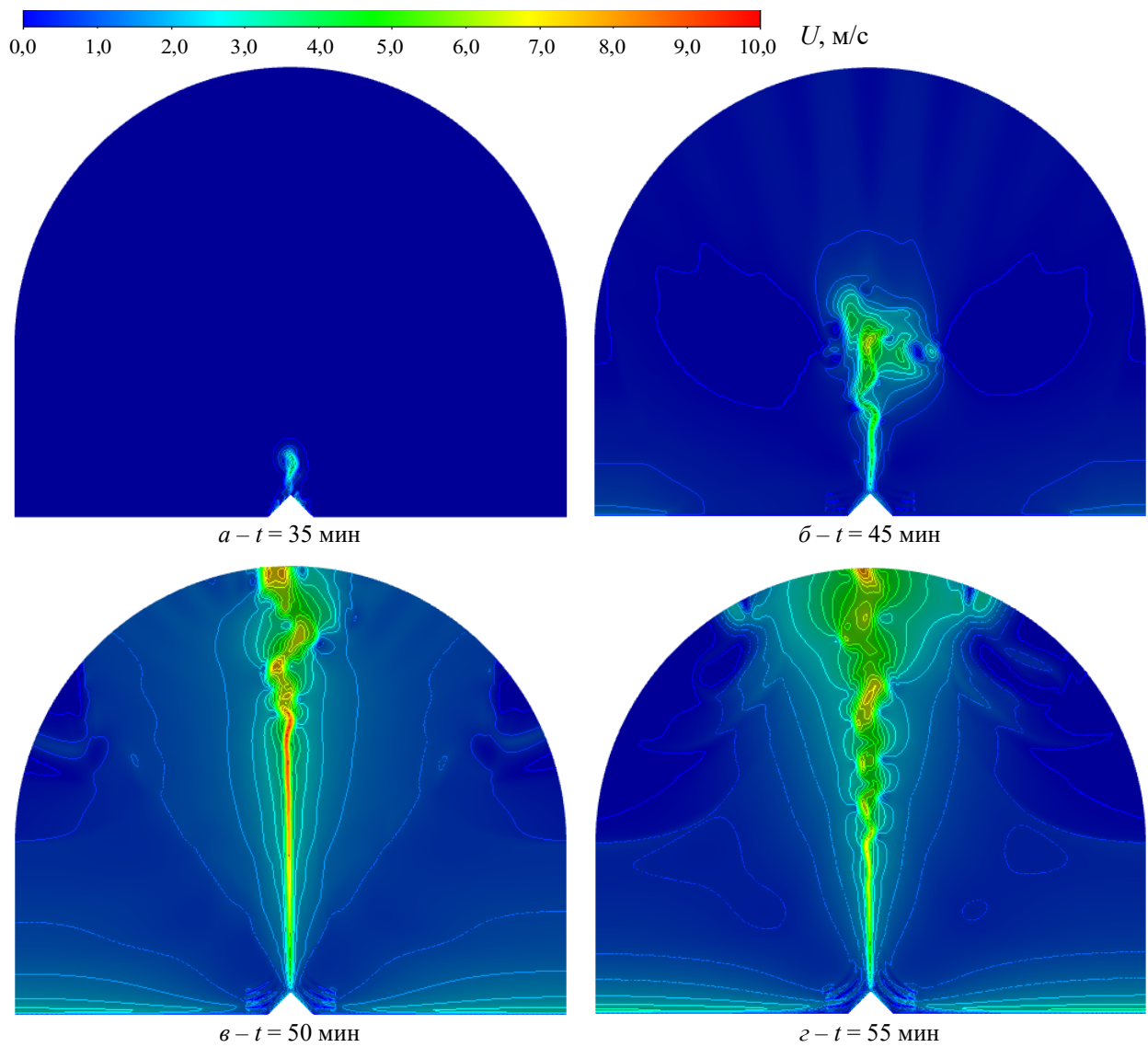


Рисунок 3. – Распределение скорости движения газовой среды в различные моменты времени после охвата пожаром поверхности крыши

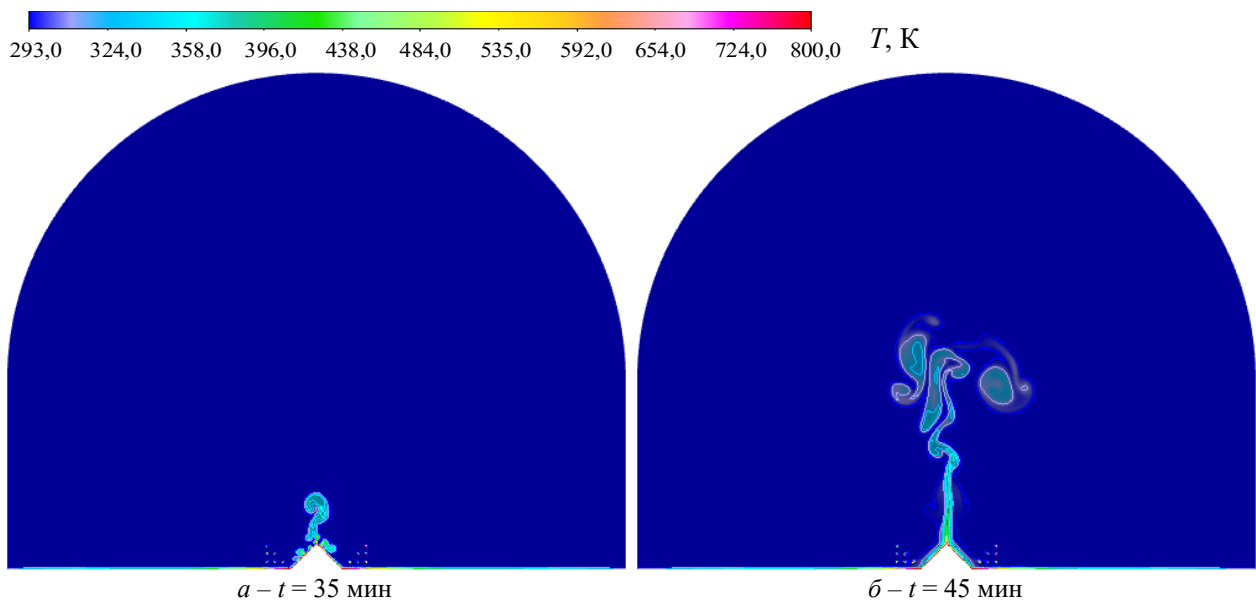
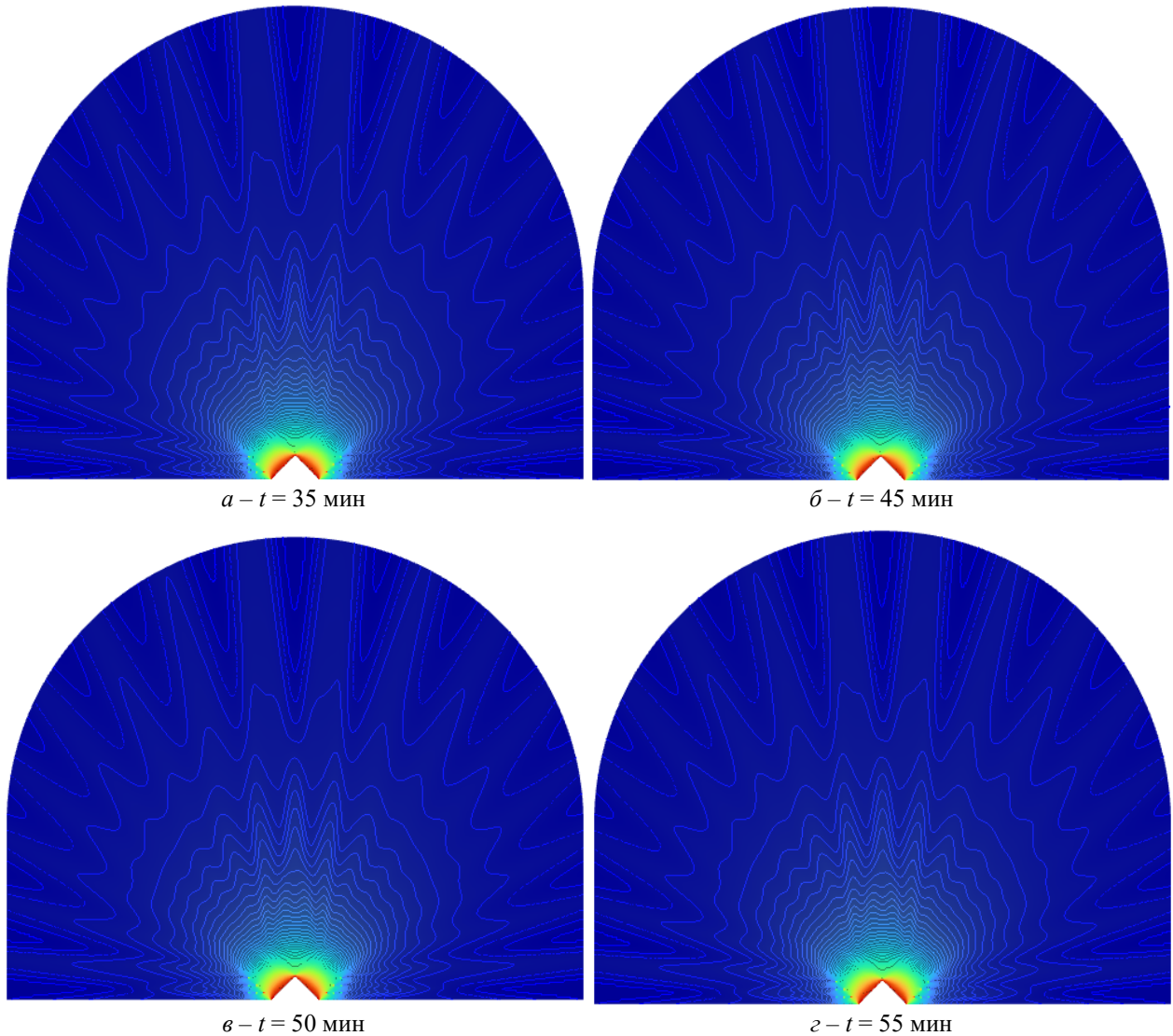
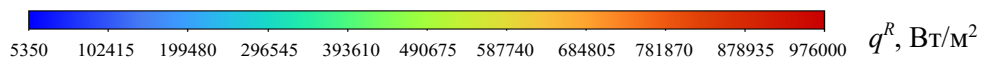
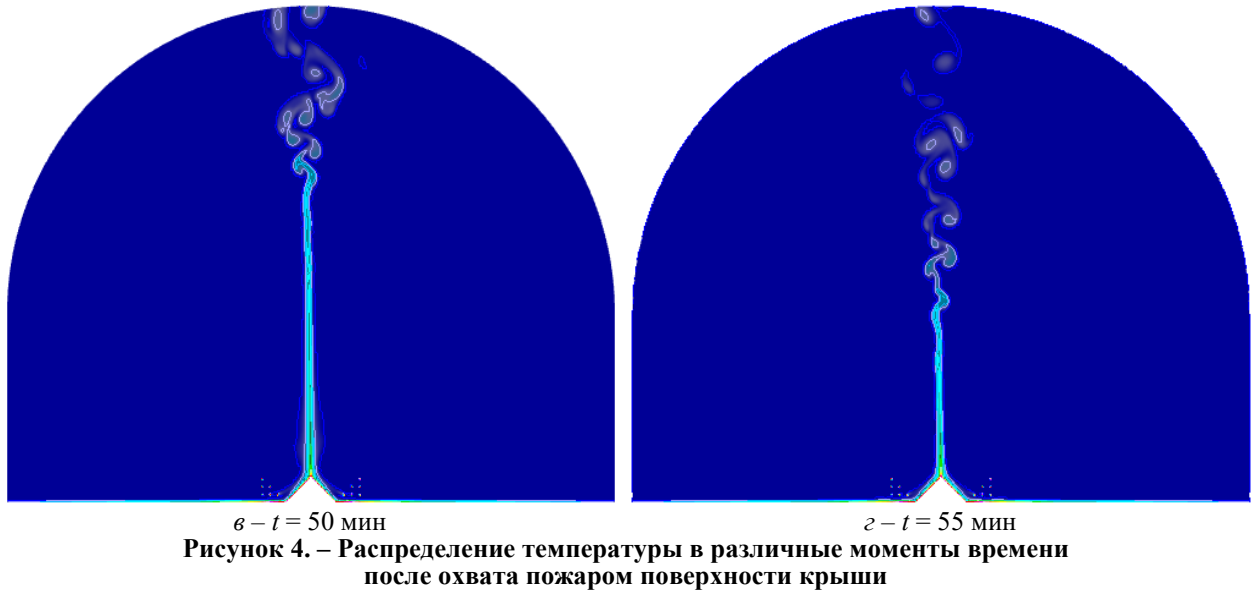


Рисунок 4. – Распределение температуры в различные моменты времени после охвата пожаром поверхности крыши



Изменение плотности теплового потока на датчиках в диапазоне времени после формирования конвективного следа (рис. 6) демонстрирует изменение потока в зависимости от динамической структуры течения газовой среды около них. Можно отметить, что в среднем интенсивность лучистого теплового потока, падающего на датчики, составляет $6,0 \text{ кВт/м}^2$, что согласуется с результатами экспериментальных исследований [1]. При этом плотность теплового потока в зависимости от расположения датчиков изменяется в диапазоне от $4,5$ до $8,0 \text{ кВт/м}^2$. Следует отметить, что в отличие от численного моделирования в ходе экспериментальных исследований имеет место обрушение элементов конструкции (53–57 мин). Данное обстоятельство приводит к изменению геометрии очага пожара и увеличению площади излучающих поверхностей. В результате в интервале времени с 54-й по 56-ю мин наблюдается рост плотности теплового потока, регистрируемого датчиками.

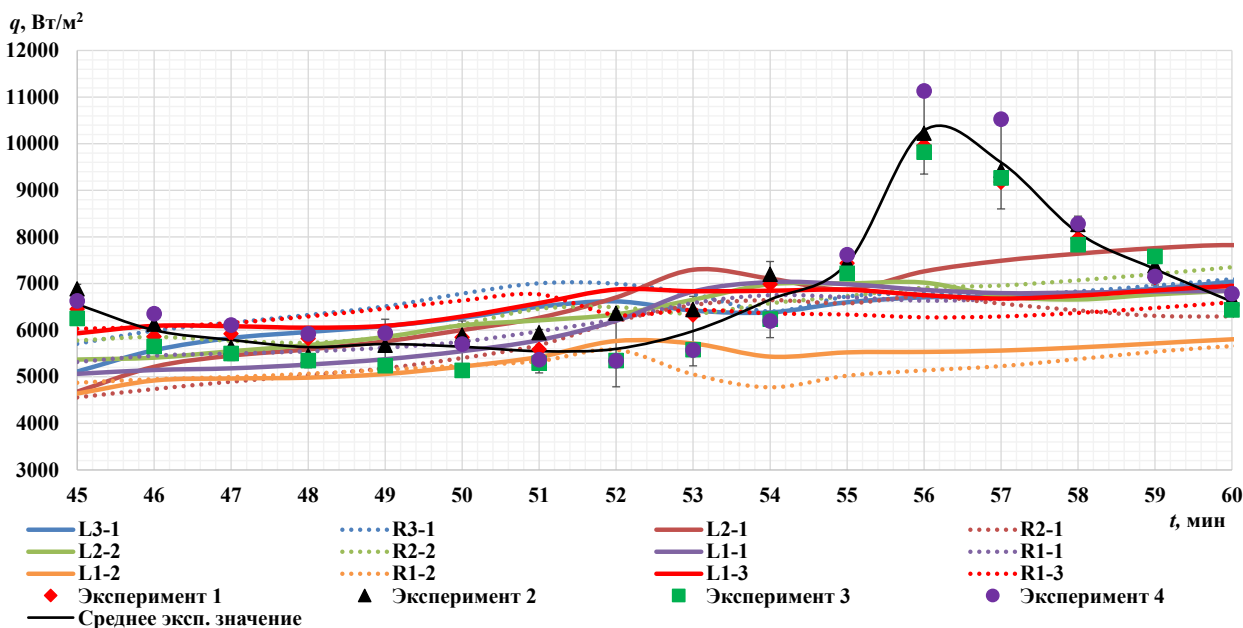


Рисунок 6. – Изменение плотности лучистого теплового потока на датчиках во времени

Расположение датчиков (пластин) и их подпись соответствуют расположению, приведенному на рисунке 2а. Датчики, которые располагались справа от фрагмента двускатной крыши, маркировались с буквой «R», соответственно с левой стороны – «L», зеркально. На рисунке 7 приведено изменение температуры поверхности датчиков в том же интервале времени.

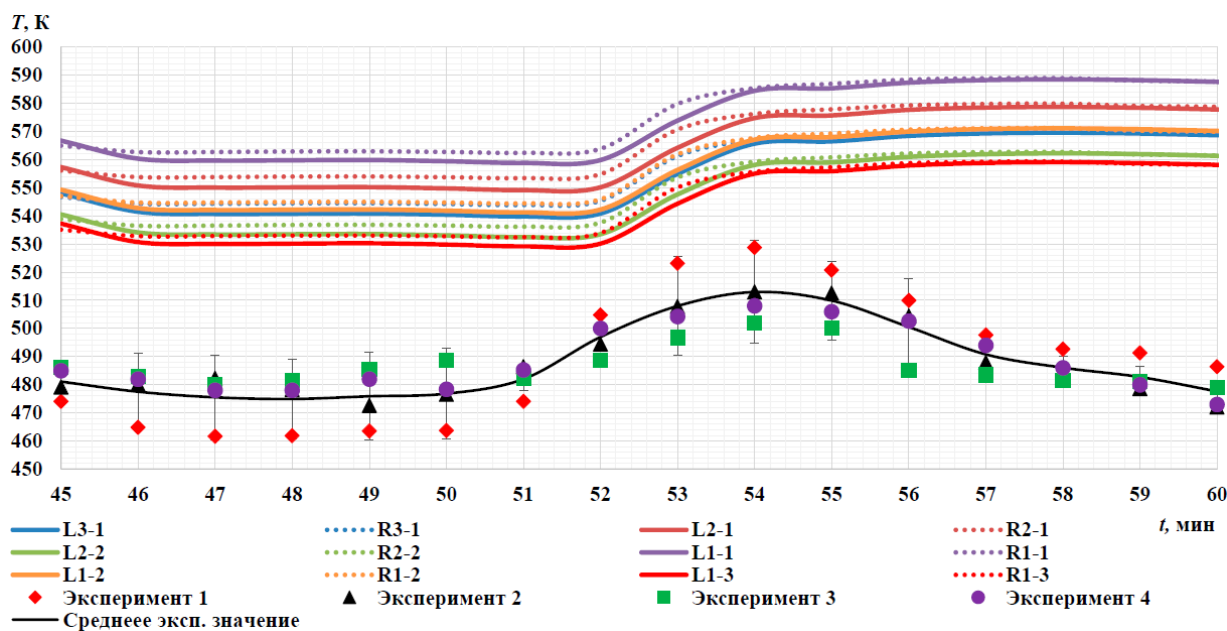


Рисунок 7. – Изменение температуры поверхности датчиков во времени

Как видно, изменение температуры также зависит от места расположения датчика. Диапазон изменения температуры лежит в интервале от 530 до 590 К. Расчетные зависимости, полученные в результате численного моделирования, демонстрируют более высокие значения температуры по сравнению с экспериментальными данными. Максимальное расчетное значение температуры поверхности датчиков составляет порядка 575 К, тогда как максимальное экспериментально зафиксированное значение не превышает 530 К. При этом расхождение между расчетными и экспериментальными значениями температуры в относительном выражении составляет 8,5 %, что свидетельствует о достаточном согласовании результатов. Отмеченная разница может быть обусловлена упрощениями, принятыми при численном моделировании, а также отличиями реальных условий теплообмена в эксперименте.

Заключение

Разработана физико-математическая модель нестационарного теплопереноса при горении скатных крыш, выполненных из горючих строительных материалов, основанная на решении уравнений газодинамики, турбулентного горения, пиролиза материалов, сажеобразования и лучистого теплообмена с использованием метода дискретных ординат. Модель реализована в программной среде ANSYS Fluent и учитывает как конвективную, так и радиационную составляющие теплового воздействия очага пожара на окружающее пространство.

При использовании данной модели получены пространственно-временные распределения скорости движения газовой среды, плотности лучистого теплового потока и температуры. Установлено, что в точках на расстоянии 1 м по горизонтали и 1 м по вертикали от поверхности крыши значения плотности теплового потока лежат в диапазоне от 4,5 до 8,0 кВт/м², а температуры на поверхности датчиков от 530 до 590 К. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по плотности теплового потока и температурам поверхности датчиков, показавшее достаточное согласование результатов. Относительное расхождение между расчетным и максимальным экспериментальными значениями температуры не превышает 8,5 %, что подтверждает достоверность разработанной модели и корректность принятых граничных условий.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения геометрических параметров излучающей поверхности при горении скатных крыш, а также для модернизации инженерных методик расчета противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями с крышами, выполненными из горючих материалов.

Геометрические параметры и формы излучающих поверхностей при горении ската и фронтона двускатной кровли были определены в ходе моделирования, выполненного в рамках проекта Ф24М-029 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (государственная регистрация № 20241248).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пастухов, С.М. Инженерная методика определения противопожарных разрывов между зданиями с двускатными крышами, выполненными из горючих материалов / С.М. Пастухов, А.Д. Чорный, А.В. Тетерюков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 2. – С. 139–154. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.139. – EDN: ATFSVQ.
2. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
3. Пожарная профилактика в строительстве: учебник / Б.В. Грушевский [и др.]; под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М., 1985. – 454 с.
4. Chitty, R. External fire spread: building separation and boundary distances: Report BR 187 / R. Chitty. – 2nd ed. – Garston, Watford: Building Research Establishment, 2014. – 68 p. – ISBN 9781848063198.
5. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics / D. Drysdale. – Chichester: University of Edinburgh, 1999. – 470 p.
6. Karlsson, B. Enclosure Fire Dynamics / B. Karlsson, J.G. Quintiere. – Boca Raton: CRC Press, 2000. – 316 p.
7. Carlsson, E. External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research / E. Carlsson. – Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1999. 125 p.

8. Зайцев, В.В. Противопожарные расстояния между автотранспортными средствами на открытых пространствах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Зайцев Владимир Викторович; Акад. гос. противопожар. службы МЧС России. – М., 2006. – 122 л.
9. Хабибулин, Р.Ш. Устойчивость к воздействию тепловых потоков пожара горизонтальных резервуаров с нефтепродуктом: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Хабибулин Ренат Шамильевич; Акад. гос. противопожар. службы МЧС России. – М., 2010. – 162 л.
10. Мироненко, Р.В. Ограничение распространения пожара через многосветные помещения по зданиям торгово-развлекательных центров: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Мироненко Роман Владимирович; Акад. гос. противопожар. службы МЧС России. – М., 2017. – 145 л.
11. Гоман, П.Н. Воспламеняемость наземного горючего материала хвойных насаждений при воздействии теплового излучения лесного пожара: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02 / Гоман Павел Николаевич; Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь. – Мн., 2013. – 163 л.
12. Пастухов, С.М. Методика проведения экспериментальных исследований по определению геометрических параметров пламени при горении кровельных материалов / С.М. Пастухов, А.В. Тетерюков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 176–185. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176. – EDN: XPAХID.
13. Пастухов, С.М. Математическая модель определения углового коэффициента облученности при расчете противопожарных разрывов между зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов / С.М. Пастухов, А.С. Платонов, А.В. Тетерюков, А.С. Дробыш // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 93–103. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. – EDN: DBRUSN.
14. Пастухов, С.М. Математическая модель определения углового коэффициента облученности для расчета плотности теплового потока, приходящего от излучателя плоской формы / С.М. Пастухов, А.С. Платонов, А.В. Тетерюков, А.С. Дробыш // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 1. – С. 5–20. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.9-1.5. – EDN: DIVTKW.
15. Пастухов, С.М. Анализ подходов по оценке минимально допустимых расстояний между зданиями при воздействии пожара / С.М. Пастухов, С.М. Жамойдик, А.В. Тетерюков // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2 (20). – С. 23–31. – EDN: SWENLV.
16. Field modeling approach // Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice / edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. – Butterworth-Heinemann, 2009. – Chapter 2. – P. 29–133. – DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00002-8.
17. Рыжов, А.М. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: методические рекомендации / А.М. Рыжов, И.Р. Хасанов, А.В. Карпов [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2003. – 35 с.
18. Cameron A., Asimakopoulou E. Radiative heat transfer methodologies from compartment fires to adjacent walls: A numerical investigation / A. Cameron, E. Asimakopoulou // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2885. – Article 012027. – 6 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/2885/1/012027.
19. Pesic, D. Anghel I. Simulation of fire spread between residential buildings regarding safe separation distance / D. Pesic, D. Zigar, M. Raos, I. Anghel // Technical gazette – 2017. Vol. 24, No. 4. – P. 1137–1145. – DOI: 10.17559/TV-20150923233514.
20. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal (AIAA Journal). – 1994. – Vol. 32, No. 8. – Pp. 1598–1605. – DOI: 10.2514/3.12149.
21. Снегирев, А.Ю. Моделирование теплообмена и горения при пожаре: дис. ... докт. техн. наук: 01.04.14 / Снегирев Александр Юрьевич; Академия гражданской авиации. – СПб., 2004. – 271 л.
22. Magnussen, B.F. Effects of turbulent structure and local concentrations on soot formation and combustion in C₂H₂ diffusion flames / B.F. Magnussen, B.H. Hjertager, J.G. Olsen, D. Bhaduri // Symposium (International) on Combustion. – 1979. – Vol. 17, No. 1. – P. 1383–1393. – DOI: 10.1016/S0082-0784(79)80130-7.
23. Fiveland, W.A. Discrete-ordinates solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures / W.A. Fiveland // ASME Journal of Heat and Mass Transfer. – 1984. – Vol. 106, No. 4. – P. 699–706. – DOI: 10.1115/1.3246741.
24. Additional considerations in field modeling // Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice / edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. – Butterworth-Heinemann, 2009. – Chapter 3. – P. 135–266. – DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00003-X.

25. Parsa, V. Computational fluid dynamics of compartment fires: A review of methods and applications / V. Parsa, A. Santiago, L. Laím // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 5. – Article 2342. – DOI: 10.3390/app15052342.
26. Fletcher, D.F. Numerical simulation of smoke movement from a pool fire in a ventilated tunnel / D.F. Fletcher, J.H. Kent, V.B. Apte, A.R. Green // *Fire Safety Journal*. – 1994. – Vol. 23, No. 3. – P. 305–325. – DOI: 10.1016/0379-7112(94)90033-7.
27. Further considerations in field modeling // *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice* / edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. – Butterworth-Heinemann, 2009. – Chapter 4. – P. 267–365. – DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00004-1.
28. Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis / C. Di Blasi // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2008. – Vol. 34, No. 1. – P. 47–90. – DOI: 10.1016/j.pecs.2006.12.001.
29. Kung, H.C. A mathematical model of wood pyrolysis / H.C. Kung // *Combustion and Flame*. – 1972. – Vol. 18, No. 2. – P. 185–195. – DOI: 10.1016/S0010-2180(72)80134-2.
30. Пожарная безопасность в строительстве: учебник в 2 ч. / В.М. Есин, С.П. Калмыков, М.В. Панов [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – Ч. 1. Пожарная безопасность систем отопления и вентиляции. – 275 с.

Моделирование пожара при горении скатных крыш
Fire modeling of pitched roof combustion

Полевода Иван Иванович

доктор технических наук, профессор
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

Grand PhD in Technical Sciences, 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

Чорный Андрей Дмитриевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное научное учреждение
«Институт тепло- и массообмена имени
А.В. Лыкова Национальной академии
наук Беларуси», лаборатория турбулентности,
заведующий лабораторией

Адрес: ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Беларусь

Email: anchor@hmti.ac.by

SPIN-код: 7604-9094

Andrey D. Chorny

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

State Scientific Institution
«A.V. Luikov Institute of Heat and Mass
Transfer of the National Academy of Sciences
of Belarus», Turbulence Laboratory,
Head of Laboratory

Address: P. Brovki str., 15,
220072, Minsk, Belarus

Email: anchor@hmti.ac.by

ORCID: 0000-0003-4716-6123

ScopusID: 14048109000

Тетерюков Алексей Васильевич

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

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

Email: teter9212@gmail.com

SPIN-код: 4855-1354

Aleksey V. Teteryukov

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

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

Email: teter9212@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7405-5774

FIRE MODELING OF PITCHED ROOF COMBUSTION**Palevoda I.I., Chorny A.D., Teteryukov A.V.**

Purpose. To develop a physico-mathematical model and to determine the regularities of thermal and gas-dynamic interaction during the combustion of pitched roofs made of combustible building materials using computational fluid and gas dynamics methods. The processes of convective and radiative heat flux formation are to be considered in order to further refine the geometric parameters of the radiating surface and to assess the thermal impact on adjacent buildings and structures.

Methods. Numerical simulation of pitched roof combustion in *ANSYS Fluent 2022 R2*. The calculations were made using the SST $k-\omega$ turbulence model, a turbulent combustion model incorporating the eddy dissipation model, the discrete ordinates method for radiative heat transfer, a pyrolysis model for roofing materials, and a single-step soot formation model. Boundary conditions were specified based on previously conducted experimental studies.

Findings. Spatial-temporal distributions of temperature fields and heat flux intensities during pitched roof combustion were obtained. Based on the results of numerical simulations performed in the *ANSYS Fluent* software environment, it was established that during roof combustion, at a distance of 1 m horizontally and 1 m vertically from the gable and the roof slope, the temperature values range from 530 to 590 K, while the heat flux density varies from 4.5 to 8.0 kW/m². The obtained data are in good agreement with the results of experimental studies, confirming the validity of the model. The processes of pyrolysis, turbulent combustion, radiative heat transfer, and soot formation in the modeling of pitched roof combustion were comprehensively investigated.

Application field of research. Determination of fire separation distances between buildings with roofs made of combustible materials. The obtained data can be used to improve engineering methodologies and fire safety regulatory documents and are also of practical interest to engineering organizations, design institutes, personnel of the MES, research and educational institutions.

Keywords: fire separation distance, roof combustion, numerical modeling, heat and mass transfer, heat flux density, computational fluid and gas dynamics.

(The date of submitting: January 12, 2026)

REFERENCES

1. Pastukhov S.M., Chorny A.D., Teteryukov A.V. Inzhenernaya metodika opredeleniya protivopozharnykh razryvov mezhdu zdaniyami s dvuskatnymi kryshami vypolnennymi iz goryuchikh materialov [Engineering method for determining fire safety spacing between buildings with gable roofs made of combustible materials]. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 2. Pp. 139–154. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.139. EDN: ATFSVQ.
2. Roytman M.Ya. *Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve* [Fire safety regulation in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 590 p. (rus).
3. Grushevskiy B.V., Yakovlev A.I., Krivosheev I.N., Shurin E.T., Klimushin N.G. *Pozharnaya profilaktika v stroitel'stve* [Fire prevention in construction]: textbook. Ed. by V.F. Kudalenkin. Moscow: Glavmosstroy, 1985. 454 p. (rus)
4. Chitty R. *External fire spread: building separation and boundary distances*: Report BR 187. 2nd ed. Garston, Watford: Building Research Establishment, 2014. 68 p. ISBN 9781848063198.
5. Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester: University of Edinburgh, 1999. 470 p. ISBN 0471972908.
6. Karlsson B., Quintiere J.G. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 316 p. ISBN 0849313007.
7. Carlsson E. *External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research*. Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1999. 125 p.
8. Zaytsev V.V. *Protivopozharnye rasstoyaniya mezhdu avtotransportnymi sredstvami na otkrytykh prostanstvakh* [Fire safety distances between vehicles in open spaces]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. State Fire Academy of EMERCOM of Russia. Moscow, 2006. 122 p. (rus)
9. Khabibulin R.Sh. *Ustoichivost' k vozdeistviyu teplovykh potokov pozhara gorizontallykh rezervuarov s nefteproduktom* [Resistance to fire heat flux impact of horizontal reservoirs with petroleum products]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. State Fire Academy of EMERCOM of Russia. Moscow, 2010. 162 p. (rus).
10. Mironenko R.V. *Ogranichenie rasprostraneniya pozhara cherez mnogosvetnye pomeshcheniya po zdaniyam trgovno-razvlekatel'nykh tsentrov* [Limiting fire spread through multi-light spaces in shopping

- and entertainment center buildings]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. State Fire Academy of EMERCOM of Russia. Moscow, 2017. 145 p. (rus)
11. Goman P.N. *Vosplamyaemost' nazemnogo goryuchego materiala khvoinykh nasazhdeniy pri vozdeystvii teplovogo izlucheniya lesnogo pozhara* [Inflammability of ground combustible material in coniferous plantations under the influence of thermal radiation from a forest fire]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus. Minsk, 2013. 163 p. (rus).
 12. Pastukhov S.M., Teteryukov A.V. Metodika provedeniya eksperimental'nykh issledovaniy po opredeleniyu geometricheskikh parametrov plameni pri gorenii krovel'nykh materialov [The method of experimental researches to determine the geometric parameters of the flame during combustion of roofing materials]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 176–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176. EDN: XPAXID.
 13. Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Matematicheskaya model' opredeleniya uglovogo koeffitsienta obluchennosti pri raschete protivopozharnykh razryvov mezhdu zdaniyami s dvuskatnymi kryshami vypolnennymi iz goryuchikh materialov [Mathematical model for determining the configuration factor when calculating fire risks between buildings with double roofs made of combustible materials]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 1. Pp. 93–103. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. EDN: DBRUSN.
 14. Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Matematicheskaya model' opredeleniya uglovogo koeffitsienta obluchennosti dlya rascheta plotnosti teplovogo potoka, prikhodyashchego ot izluchatelya ploskoy formy [Mathematical model for determining the angular irradiation coefficient for calculating the heat flux density coming from a plane-shaped emitter]. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 1. Pp. 5–20. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.9-1.5. EDN: DIVTKW.
 15. Pastukhov S.M., Zhamoydik S.M., Teteryukov A.V. Analiz podkhodov po otsenke minimal'no dopustimyykh rasstoyaniy mezhdu zdaniyami pri vozdeystvii pozhara [Analysis approaches for the assessment minimum distance between the buildings at the case of fire exposure]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 2 (20). Pp. 23–31. (rus). EDN: SWENLV.
 16. Field modeling approach. *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice*. Edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. Butterworth-Heinemann, 2009. Chapter 2. Pp. 29–133. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00002-8.
 17. Ryzhov A.M., Khasanov I.R., Karpov A.V., Volkov A.V., Litskevich V.V., Dekterev A.A. *Primenenie polevogo metoda matematicheskogo modelirovaniya pozharov v pomeshcheniyakh* [Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires]: methodological recommendations. Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2003. 35 p. (rus).
 18. Cameron A., Asimakopoulou E. Radiative heat transfer methodologies from compartment fires to adjacent walls: A numerical investigation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024. Vol. 2885. Article 012027. 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2885/1/012027.
 19. Pesic D., Zigar D., Raos M., Anghel I. Simulation of fire spread between residential buildings regarding safe separation distance. *Technical gazette*, 2017. Vol. 24, No. 4. Pp. 1137–1145. DOI: 10.17559/TV-20150923233514.
 20. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal (AIAA Journal)*, 1994. Vol. 32, No. 8. Pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
 21. Snegirev A.Yu. *Modelirovanie teplomassoobmena i goreniya pri pozhare* [Modeling of heat and mass transfer and combustion in fire]: Grand PhD tech. sci. diss.: 01.04.14. Academy of Civil Aviation. Saint-Petersburg, 2004. 271 p. (rus)
 22. Magnussen B.F., Hjertager B.H., Olsen J.G., Bhaduri D. Effects of turbulent structure and local concentrations on soot formation and combustion in C₂H₂ diffusion flames. *Symposium (International) on Combustion*, 1979. Vol. 17, No. 1. Pp. 1383–1393. DOI: 10.1016/S0082-0784(79)80130-7.
 23. Fiveland W.A. Discrete-ordinates solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984. Vol. 106, No. 4. Pp. 699–706. DOI: 10.1115/1.3246741.
 24. Additional considerations in field modeling. *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice*. Edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. Butterworth-Heinemann, 2009. Chapter 3. Pp. 135–266. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00003-X.
 25. Parsa V., Santiago A., Laim L. Computational fluid dynamics of compartment fires: A review of methods and applications. *Applied Sciences*, 2025. Vol. 15, No. 5. Article 2342. DOI: 10.3390/app15052342.

26. Fletcher D.F., Kent J.H., Apte V.B., Green A.R. Numerical simulation of smoke movement from a pool fire in a ventilated tunnel. *Fire Safety Journal*, 1994. Vol. 23, No. 3. Pp. 305–325. DOI: 10.1016/0379-7112(94)90033-7.
27. Further considerations in field modeling. *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice*. Edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. Butterworth-Heinemann, 2009. Chapter 4. Pp. 267–365. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00004-1.
28. Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008. Vol. 34, No. 1. Pp. 47–90. DOI: 10.1016/j.peccs.2006.12.001.
29. Kung H.C. A mathematical model of wood pyrolysis. *Combustion and Flame*, 1972. Vol. 18, No. 2. Pp. 185–195. DOI: 10.1016/S0010-2180(72)80134-2.
30. Esin V.M., Kalmykov S.P., Panov M.V. [et al.]. *Pozharnaya bezopasnost' v stroitel'stve* [Fire safety in construction]: textbook in 2 parts. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2013. Part 1. *Pozharnaya bezopasnost' sistem otopeniya i ventilyatsii* [Fire safety of heating and ventilation systems]. 275 p. (rus)

Copyright © 2026 Palevoda I.I., Chorny A.D., Teteryukov A.V.

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

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ МНОГОПУСТОТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПРИ СТАНДАРТНОМ ПОЖАРЕ

Нехань Д.С., Левданский А.А.

Цель. Разработать инженерную методику расчета температурного поля в поперечном сечении многопустотных железобетонных плит (толщиной 150–250 мм) с симметрично расположенными (относительно центра тяжести) замкнутыми полостями круглого сечения (объемом от 40 до 60 %) при одностороннем воздействии стандартного температурного режима пожара, базирующуюся на адаптации упрощенного решения нелинейного уравнения теплопроводности для полнотелых плит с помощью поправочных коэффициентов, полученных на основе численного моделирования и учитывающих геометрию сечения, координаты точек и время нагрева.

Методы. Численное моделирование нагрева железобетонных плит при стандартном пожаре методом конечных элементов на основе планирования полного факторного эксперимента. Обобщение результатов моделирования и анализ влияния геометрических параметров сечения многопустотных плит и длительности воздействия стандартного пожара на температурное поле, формируемое в них. Адаптация существующей методики расчета температурного поля в полнотелых плитах при тепловом воздействии стандартного пожара для применения к многопустотным плитам.

Результаты. Установлены закономерности влияния геометрических параметров многопустотных железобетонных плит (толщина, объем замкнутых полостей круглого сечения) на динамику температурного поля в поперечном сечении (на глубине до 0,3 толщины конструкции) при одностороннем воздействии стандартного пожара длительностью от 30 до 180 мин. Получено уравнение регрессии для определения коэффициента k_{hol} , учитывающего приращение температуры на заданном расстоянии от нагреваемой поверхности в многопустотных плитах по сравнению с полнотелыми аналогами при одностороннем воздействии стандартного температурного режима. Разработана инженерная методика оценки температурного поля в многопустотных железобетонных плитах (толщиной 150–250 мм при объеме замкнутых полостей круглого сечения 40–60 %) при стандартном огневом воздействии.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы специалистами проектных, экспертных и научных организаций при решении упрощенными методами теплотехнической задачи огнестойкости для многопустотных железобетонных плит, а также при совершенствовании действующих нормативных правовых актов.

Ключевые слова: многопустотные железобетонные плиты, стандартный температурный режим пожара, огнестойкость, численное моделирование, полный факторный эксперимент, теплотехническая задача, Ansys Workbench, коэффициент пустотности.

(Поступила в редакцию 8 января 2026 г.)

Введение

Многопустотные плиты получили широкое распространение в гражданском и промышленном строительстве в Республике Беларусь и за рубежом. Этому способствует ряд факторов: экономичность производства (снижение расхода бетона, уменьшение массы изделия), технологичность изготовления и высокие эксплуатационные показатели. Вибрационное уплотнение бетонной смеси при производстве обеспечивает ее равномерное распределение вокруг пустотообразователей, эффективное удаление излишков воздуха и формирование плотной структуры бетона. Особенно активно такие изделия применяются в качестве перекрытий многоэтажных зданий, где требуется сочетание высокой несущей способности, легкости, а также повышенных теплоизоляционных и акустических свойств [1].

Пожары относятся к числу наиболее опасных явлений, сопровождающих развитие человеческой цивилизации на протяжении ее существования. Под воздействием высоких температур пожара строительные конструкции утрачивают свои функции (ограждающие и несущие), что приводит к получению травм людьми, их отравлению, гибели, а также

материальному ущербу [2]. Согласно техническому регламенту ТР 2025/013 ВУ¹ строительные изделия, в том числе применяемые для создания строительных конструкций зданий и сооружений, должны соответствовать требованиям пожарной безопасности. Для выполнения указанных требований в Республике Беларусь реализуется комплекс мер по пассивной противопожарной защите, включающих совокупность инженерно-технических мероприятий противопожарной защиты, реализуемых на стадии разработки проекта строительства, реконструкции (модернизации), технической модернизации, капитального ремонта зданий и сооружений. Базовым элементом пассивной противопожарной защиты является обеспечение огнестойкости зданий и сооружений [3], достигающееся применением строительных конструкций с нормированными пределом огнестойкости и классом пожарной опасности. При рассмотрении строительных конструкций, выполненных из негорючих материалов, анализируют только предел огнестойкости, поскольку указанные конструкции являются непожароопасными (класс пожарной опасности К0). Предел огнестойкости конструкций характеризуется промежутком времени от начала огневого воздействия в условиях стандартных испытаний до наступления одного из нормируемых для данной конструкции предельных состояний по огнестойкости. Для плит перекрытия такими предельными состояниями считаются потеря несущей способности (R), потеря целостности (E) и потеря теплоизолирующей способности (I).

Оценка огнестойкости проводится экспериментальным методом² (огневые испытания), а также теоретическими^{3,4} (общие, упрощенные методы расчета и табличные данные). Оценка огнестойкости расчетными методами состоит из решения двух последовательных задач: теплотехнической и прочностной. Теплотехнический расчет заключается в определении температурного поля в конструкции при стандартном огневом воздействии для заданного промежутка времени.

Известна методика расчета температур в сечении железобетонных конструкций⁵, которая успешно применяется для однородных конструкций сплошного сечения. Реализация указанной методики стала возможна вследствие перехода от решения краевых задач второго и третьего рода к граничным условиям первого рода путем введения в расчетную схему «фиктивного слоя». На внешней поверхности этого слоя принимается расчетная температура, равная 1220 °С, что соответствует предельному значению стандартного температурного режима при длительности воздействия около 6 часов [4]. Наличие воздушных полостей в многопустотных железобетонных плитах ограничивает применение указанной методики для определения температурных полей. Воздушные прослойки, обладая иными теплофизическими характеристиками по сравнению с бетоном, существенно изменяют направление и интенсивность теплопереноса в сечении.

Результаты исследований температур в сечении полых железобетонных конструкций, нагреваемых по всему внешнему периметру, в сравнении со сплошными конструкциями таких же внешних размеров, указывают на значительное увеличение температур в бетоне при отсутствии бетонного ядра. Так, для железобетонных колонн кольцевого сечения внешним диаметром 560 мм и толщиной стенки 55 мм при стандартном огневом воздействии продолжительностью 180 мин превышение температур в стенке по сравнению со сплошным сечением достигает двукратного значения. Данный эффект наиболее отчетливо проявляется спустя 45 мин теплового воздействия и усиливается при увеличении расстояния от нагреваемой поверхности вглубь конструкции [5].

В СП 468.1325800.2019⁶ приведены графики зависимости температуры нагрева обычного тяжелого бетона (бетона нормального веса) в многопустотных и сплошных плитах (толщиной 150–220 мм с диаметром пустот 80–160 мм) от времени одностороннего воздействия

¹ О безопасности строительных материалов и изделий: ТР 2025/013/ВУ: срок действия с 08.09.2025 / утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 03.03.2025 № 135. – Мн.: Госстандарт, 2025. – II, 12 с.

² Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Взамен СТ СЭВ 1000-78; введ. 01.01.1996. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – III, 8 с.

³ Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250). – Введ. 01.01.2010. – Мн.: Минстройархитектуры, 2022. – X, 77 с.

⁴ Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Взамен П1-02 к СНБ 2.02.01-98; введ. 01.01.2009. – Мн.: Минстройархитектуры, 2008. – III, 127 с.

⁵ См. сноску 4.

⁶ Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности: СП 468.1325800.2019. – Введ. 11.06.2020. – М.: Минстрой России, 2019: Стандартинформ, 2020. – IV, 82 с.

стандартного пожара. Анализ данных графиков указывает на значительную разницу в нагреве поперечного сечения многопустотных и полнотелых плит. Сечение пустотелых плит нагревается значительно быстрее, чем полнотелых, что ускоряет снижение несущей способности конструкции.

Следует отметить, что оценка огнестойкости многопустотных плит согласно действующим техническим нормативным правовым актам (нормативным документам) с помощью табличных данных имеет ряд особенностей и допущений:

– при отсутствии точного термического анализа температура ниже уровня, на котором суммарная ширина ребер многопустотной плиты равна суммарной ширине пустот, принимается равной температуре в полнотелой плите. Для определения температуры выше данного уровня допускается применять линейную интерполяцию между температурой на указанном уровне и температурой на необогреваемой (верхней) поверхности перекрытия, принимаемой равной максимально допустимому значению при оценке критерия по потере теплоизолирующей способности (I)⁷;

– для многопустотных плит предел огнестойкости по потере теплоизолирующей способности (I) допускается определять как произведение установленного предела огнестойкости полнотелых плит аналогичной толщины и коэффициента 0,65 (согласно опытным данным)⁸;

– для оценки предела огнестойкости многопустотной плиты по потере целостности (E) и теплоизолирующей способности (I) руководствуются эффективной (приведенной) толщиной. Она определяется либо делением площади поперечного сечения плиты (за вычетом площадей пустот) на ее ширину⁹, либо как произведение фактической толщины на коэффициент, равный квадратному корню из отношения объема бетона в изделии к полному геометрическому объему плиты¹⁰;

– предел огнестойкости многопустотных плит по потере несущей способности (R) допускается определять по аналогии со сплошными плитами (панелями) с введением понижающего коэффициента^{11, 12} 0,9. Данный коэффициент учитывает более интенсивный нагрев арматуры в пустотных конструкциях до критических температур и является усредненным значением для плит толщиной 150–220 мм при диаметре пустот 80–160 мм и защитном слое бетона 20–40 мм (экспериментальные данные, послужившие основой для получения этого значения, варьируются в диапазоне от 0,85 до 0,92)¹³.

Из вышеизложенного следует, что наличие воздушных полостей существенно влияет на характер нагрева конструкции. Разработка на основе численного моделирования инженерной методики расчета температурного поля в сечении многопустотных железобетонных плит с симметричным расположением пустот при стандартном огневом воздействии является актуальной задачей. В основу упрощенного метода решения теплотехнической задачи будут положены известная методика расчета температур в сечении полнотелых железобетонных конструкций¹⁴ и всесторонний анализ результатов численного моделирования при заданных граничных условиях теплообмена в рамках полного факторного эксперимента. Это обеспечит возможность упрощенного решения теплотехнической задачи огнестойкости и исключит необходимость применения общего метода расчета при решении указанной задачи.

Основная часть

Наиболее достоверные результаты при определении температурного поля в железобетонных конструкциях теоретическим путем достигаются с применением методов конечно-разностного или конечно-элементного моделирования (общий метод расчета). Одним из широко используемых инструментов для конечно-элементного моделирования является

⁷ Изделия железобетонные сборные. Плиты многопустотные требования: Изм. № 1 СТБ EN 1168-2012. – Введ. 01.01.2017. – Мн.: Госстандарт, 2017. – 16 с.

⁸ См. сноску 4.

⁹ См. сноску 4.

¹⁰ См. сноску 7.

¹¹ См. сноску 4.

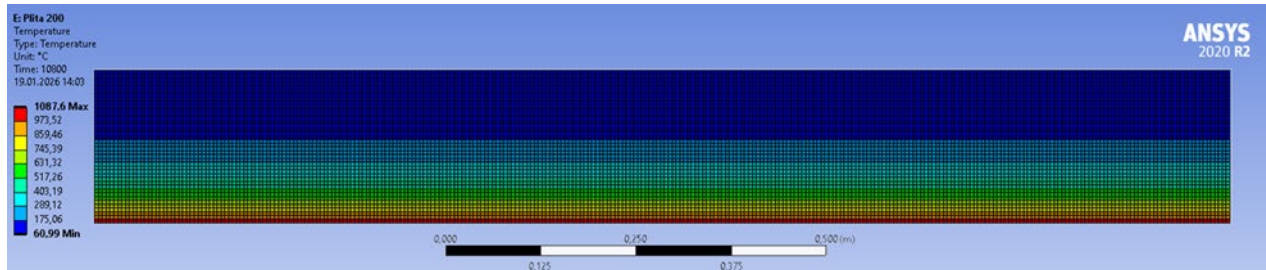
¹² См. сноску 6.

¹³ См. сноску 6.

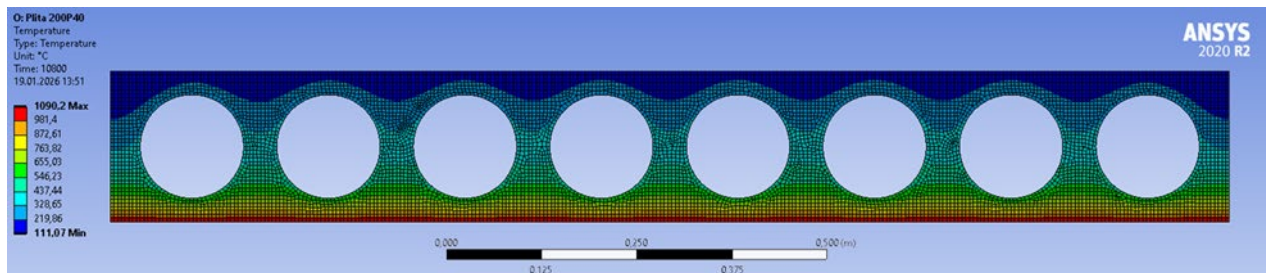
¹⁴ См. сноску 4.

программная среда Ansys Workbench 2020 R2. Модуль Transient Thermal позволяет моделировать нестационарные тепловые процессы при соответствующих начальных и граничных условиях, а также учитывать нелинейные температурные зависимости теплофизических свойств материалов. Это значительно снижает трудоемкость анализа и погрешность расчетов [5–8]. Поэтому для разработки расчетных моделей нагрева полнотелых и многопустотных железобетонных плит была использована указанная система конечно-элементного анализа.

Построение расчетных моделей. В качестве объектов моделирования выступали железобетонные плиты толщиной 150, 200 и 250 мм сплошного сечения (рис. 1а) и с полостями круглого сечения (рис. 1б), объем которых составляет 40 и 60 % от общего объема конструкции (далее – коэффициент пустотности). Пустоты равномерно распределены по горизонтали в поперечном сечении плиты.



а – полнотелая плита



б – многопустотная плита

Рисунок 1. – Расчетные модели железобетонных плит

При определении размеров конечных элементов руководствовались результатами работ [5; 8]. При создании модели приоритет целевой области физики (Physics Preference) был отдан вычислительной гидродинамике (CFD). Размер элементов конечно-элементной сетки для бетона принят равным 5 мм, что составляет 0,02...0,03 толщины плиты. Для снижения трудозатрат и объема вычислений арматура в модели не задавалась.

Зависимости теплофизических характеристик бетона приняты согласно ТКП EN 1992-1-2¹⁵ и представлены на рисунке 2. Начальная средняя плотность бетона в конструкции составляла 2500 кг/м³ при весовой влажности 2,2 %. Свойства материалов задавались в блоке Engineering Data. Параметры теплообмена между огневой средой и плитой при назначении граничных условий были приняты в соответствии с СН 2.01.03¹⁶. Начальный временной шаг расчета (Initial Time Step) составлял не более 10 с.

Начальные условия. Температура материалов плит θ_w , греющей (огневой) среды θ_f и окружающей среды (со стороны, противоположной греющей) θ_a во всех точках в начальный момент времени (при $\tau_f = 0$) принята одинаковой и равной:

$$\theta_w(x, y, z, 0) = \theta_f(x, y, z, 0) = \theta_a(x, y, z, 0) = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (1)$$

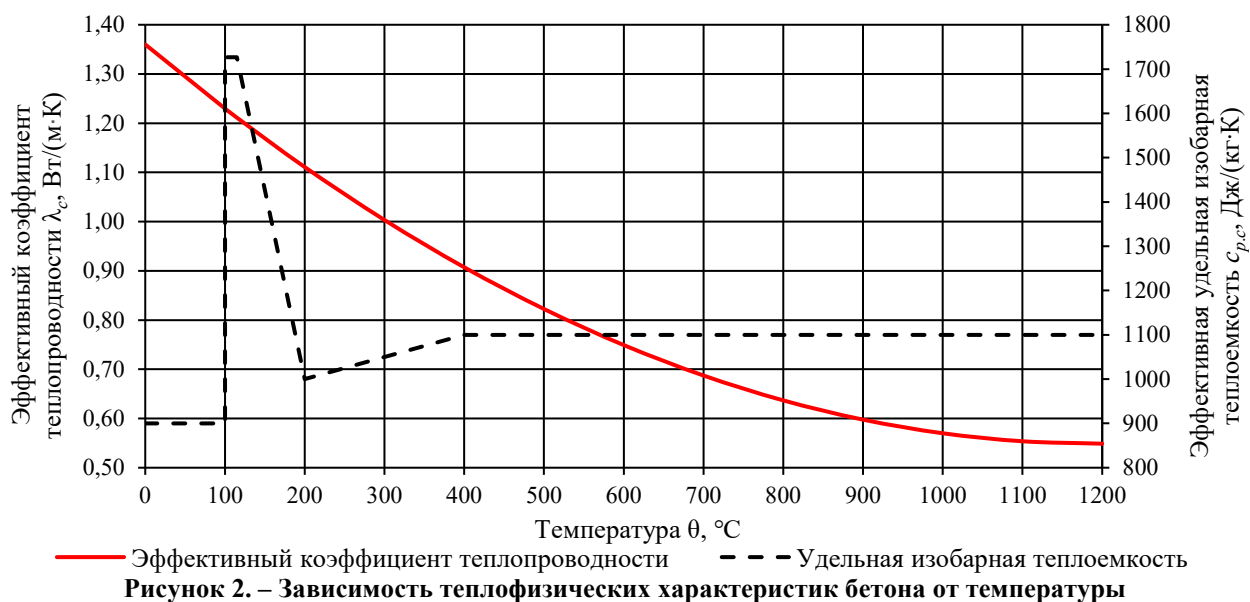
где θ_w – температура материалов плиты, $^\circ\text{C}$;

θ_f – температура греющей среды, $^\circ\text{C}$;

θ_a – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

¹⁵ См. сноску 3.

¹⁶ Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Взамен ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250); введ. 08.09.2020. – Мн.: Минстройархитектуры, 2020. – IV, 39 с.



Граничные условия. Воздействие теплового потока осуществляется равномерно по всей нижней (нагреваемой) поверхности плит. Нагрев нижней поверхности плит определялся граничными условиями 3-го рода, учитывающими конвективную и лучистую составляющие теплообмена:

$$q_{net} = \alpha_c \cdot (\theta_f - \theta_{o.w}) + \varepsilon_c \varepsilon_f \sigma \Phi \left((\theta_f + 273)^4 - (\theta_{o.w} + 273)^4 \right) = -\lambda_c \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{o.w}, \quad (2)$$

где q_{net} – результирующий удельный тепловой поток, падающий на нижнюю поверхность плиты, Вт/м²;

α_c – коэффициент теплоотдачи конвекцией, принятый равным¹⁷ 25 Вт/(м²·К);

ε_c – степень черноты поверхности бетона, принятая равной¹⁸ 0,7;

$\theta_{o.w}$ – температура нижней (нагреваемой) поверхности плиты, °С;

ε_f – степень черноты огневой среды, принятая равной¹⁹ 1,0;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана;

Φ – угловой коэффициент облученности, принятый равным²⁰ 1,0;

n – нормаль к изотермической поверхности;

индекс «o.w» относится к нижней (нагреваемой) поверхности плиты.

Зависимость температуры огневой среды θ_f от времени τ_f вблизи плит принята соответствующей стандартному температурному режиму пожара (согласно СН 2.01.03²¹):

$$\theta_f(\tau_f) = \theta_a + 345 \cdot \lg(8\tau_f + 1), \quad (3)$$

где 345 – эмпирический коэффициент, °С;

8 – эмпирический коэффициент, мин⁻¹.

Процесс передачи теплоты от верхней (необогреваемой) поверхности плит в окружающую среду определялся граничными условиями 3-го рода, учитывающими конвективную и лучистую составляющие теплообмена:

$$q_{net1} = \alpha_c \cdot (\theta_{i.w} - \theta_a) + \varepsilon_c \varepsilon_g \sigma \Phi \left((\theta_{i.w} + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right) = -\lambda_c \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{i.w}, \quad (4)$$

где q_{net1} – результирующий удельный тепловой поток, отдаваемый с необогреваемой поверхности плиты в окружающую среду, Вт/м²;

α_c – коэффициент теплоотдачи конвекцией, принятый равным²² 4 Вт/(м²·К);

¹⁷ См. сноску 16.

¹⁸ См. сноску 3.

¹⁹ См. сноску 16.

²⁰ См. сноску 16.

²¹ См. сноску 16.

²² См. сноску 16.

ε_g – степень черноты окружающей среды, принятая равной 1,0;
индекс «i.w» относится к верхней (ненагреваемой) поверхности плиты.

Боковые поверхности плит приняты идеально теплоизолированными, вследствие чего результирующий удельный тепловой поток через них принят равным нулю ($q_{net2} = 0$).

Для многпустотных плит перенос теплоты внутри пустот (от более нагретых элементарных участков к менее нагретым) определяется граничными условиями 3-го рода без учета конвективной составляющей теплообмена:

$$q_{net3} = \Phi \varepsilon_c^2 \sigma \left((\theta_{h.w} + 273)^4 - (\theta_{c.w} + 273)^4 \right) = -\lambda_c \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{h.w}, \quad (5)$$

где q_{net3} – результирующий удельный тепловой поток между более нагретыми и менее нагретыми элементарными участками, Вт/м²;

индекс «h.w» относится к более нагретому элементарному участку внутренней поверхности полости;

индекс «c.w» – к менее нагретому.

Проведение полного факторного эксперимента (ПФЭ). При использовании упрощенных (инженерных) методов для определения температур в поперечном сечении плоских железобетонных конструкций, подвергаемых нагреву с одной стороны, в настоящее время применяется формула²³ [9]:

$$\theta_w = \theta_{w0} + 1200 \cdot (1 - r)^2, \quad (6)$$

где θ_{w0} – начальная температура материалов конструкции, принимаемая равной 20 °С;

r – относительное расстояние (отношение расстояния от нагреваемой поверхности до рассматриваемой точки поперечного сечения плиты с учетом толщины «фиктивного слоя» к толщине прогретого слоя)²⁴;

1200 – эмпирический коэффициент, °С.

Для адаптации формулы (6) к расчету температуры в многпустотных железобетонных плитах исследовано влияние замкнутых полостей круглого сечения на формируемое температурное поле при одностороннем воздействии стандартного температурного режима пожара. Для этого введен коэффициент k_{hol} , характеризующий увеличение температуры в пустотной плите относительно полнотелой (при прочих равных параметрах). Коэффициент k_{hol} определяется как отношение температуры бетона в сечении многпустотной плиты θ_{hol} к температуре бетона в сечении полнотелой плиты θ_{sec} , установленных на одинаковом расстоянии x от нагреваемой поверхности²⁵ при времени стандартного огневого воздействия τ_f :

$$k_{hol} = \frac{\theta_{hol}(x, \tau_f)}{\theta_{sec}(x, \tau_f)}. \quad (7)$$

Очевидно, что коэффициент зависит от ряда определяющих параметров. В рамках настоящих исследований были выделены следующие ключевые факторы, влияющие на значение k_{hol} (рис. 3):

– относительное расстояние от обогреваемой поверхности до рассматриваемой точки (не включает толщину «фиктивного слоя») $\delta = x/t$, где t – толщина плиты;

– доля поперечного сечения, занимаемая пустотами (коэффициент пустотности): $A_{п}/A_{сеч}$, где $A_{п}$ – суммарная площадь пустот в поперечном сечении плиты; $A_{сеч}$ – общая площадь поперечного сечения плиты;

– продолжительность стандартного огневого воздействия на конструкцию τ_f .

Анализ выделенных факторов показал наличие нелинейных зависимостей между ними и коэффициентом k_{hol} . В связи с этим оценка значений k_{hol} и исследование степени влияния каждого фактора производились в рамках следующих интервалов (для плит толщиной 150, 200 и 250 мм):

– по относительному расстоянию δ : 0,00...0,15 и 0,15...0,30;

– по коэффициенту пустотности $A_{п}/A_{сеч}$: 0,4...0,6;

²³ См. сноску 4.

²⁴ См. сноску 4.

²⁵ Температура θ_{hol} на расстоянии x определяется как среднее значение по поперечному сечению, расположенному на этом расстоянии от нагреваемой поверхности.

– по длительности стандартного огневого воздействия τ_f : 0...30 мин, 30...60 мин, 60...90 мин, 90...120 мин и 120...180 мин.

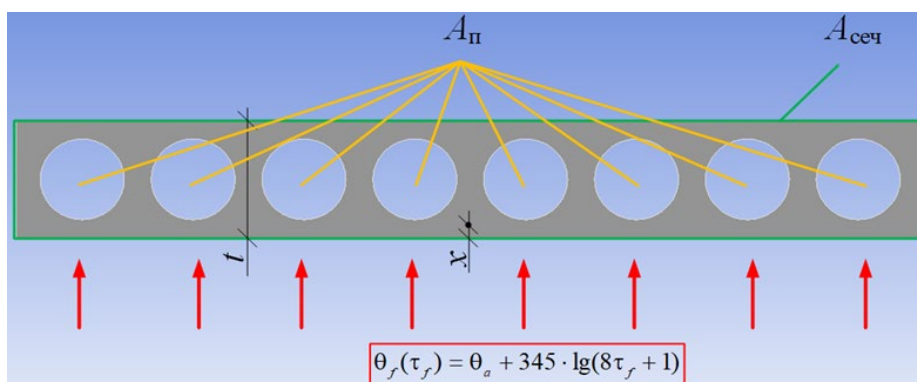


Рисунок 3. – Факторы, оказывающие влияние на значение k_{hol}

Для реализации ПФЭ исследуемые факторы на каждом из интервалов были подвергнуты процедуре кодирования. Переход от физических величин к безразмерным кодированным переменным осуществляется по следующей формуле [10]:

$$X_i = \frac{2F_i - (\max F_i + \min F_i)}{\max F_i - \min F_i}, \quad \text{где } F_1 = \delta, \quad F_2 = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{сеч}}}, \quad F_3 = \tau_f. \quad (8)$$

Матрица планирования ПФЭ и схема взаимодействия факторов, использованные для обработки результатов численного моделирования, представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Матрица планирования ПФЭ в нормированных факторах

№ эксперимента	Входные факторы			Взаимодействия факторов				Выходной фактор $Y(k_{hol})$
	$X_1 (\delta)$	$X_2 (A_{\text{п}}/A_{\text{сеч}})$	$X_3 (\tau_f)$	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	
1	+	+	+	+	+	+	+	Y_1
2	-	+	+	-	-	+	-	Y_2
3	+	-	+	-	+	-	-	Y_3
4	-	-	+	+	-	-	+	Y_4
5	+	+	-	+	-	-	-	Y_5
6	-	+	-	-	+	-	+	Y_6
7	+	-	-	-	-	+	+	Y_7
8	-	-	-	+	+	+	-	Y_8

Примечание. Знак «+» соответствует максимальному значению варьируемого фактора в заданном интервале, знак «-» – минимальному. Значения выходного фактора (отклика) k_{hol} рассчитывались в Ansys Workbench по модели, описываемой формулами (1)–(5).

Численное моделирование и обработка результатов, выполненные в рамках ПФЭ по методике [10], позволили получить уравнение регрессии для определения k_{hol} :

$$k_{hol} = k_{h0} + k_{h1}X_1 + k_{h2}X_2 + k_{h3}X_3 + k_{h12}X_1X_2 + k_{h13}X_1X_3 + k_{h23}X_2X_3 + k_{h123}X_1X_2X_3, \quad (9)$$

где $k_{h0}, k_{h1}, k_{h2}, k_{h3}, k_{h12}, k_{h13}, k_{h23}, k_{h123}$ – коэффициенты, учитывающие влияние факторов $\delta, A_{\text{п}}/A_{\text{сеч}}, \tau_f$ и их сочетания, определяемые по таблицам 2 и 3.

Таблица 2. – Коэффициенты $k_{h0}, k_{h1}, k_{h2}, k_{h3}$

$t, \text{ мм}$	$\tau_f, \text{ мин}$	δ	k_{h0}	k_{h1}	k_{h2}	k_{h3}
150	$0 < \tau_f \leq 30$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	1,060	0,0598	0,00125	0,0598
200			1,051	0,0506	-0,00062	0,0506
250			1,040	0,0395	0,00946	0,0395
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	1,194	0,0748	0,0668	0,194
200			1,146	0,0443	0,0593	0,146
250			1,147	0,0676	0,0806	0,147

Продолжение таблицы 2

t , мм	τ_f , мин	δ	k_{h0}	k_{h1}	k_{h2}	k_{h3}
150	$0 < \tau_f \leq 30$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	1,060	0,0598	0,00125	0,0598
200			1,051	0,0506	-0,00062	0,0506
250			1,040	0,0395	0,00946	0,0395
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	1,194	0,0748	0,0668	0,194
200			1,146	0,0443	0,0593	0,146
250			1,147	0,0676	0,0806	0,147
150	$30 < \tau_f \leq 60$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	1,098	0,0984	0,0104	-0,0211
200			1,098	0,0978	0,00675	-0,0035
250			1,087	0,0869	0,0186	0,00763
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	1,367	0,170	0,133	-0,0214
200			1,344	0,157	0,145	0,0573
250			1,329	0,155	0,168	0,0354
150	$60 < \tau_f \leq 90$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	1,065	0,0645	0,0198	-0,0128
200			1,084	0,0835	0,0173	-0,0108
250			1,089	0,089	0,0191	-0,00537
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	1,311	0,182	0,121	-0,0351
200			1,378	0,211	0,168	-0,0241
250			1,389	0,211	0,178	0,0246
150	$90 < \tau_f \leq 120$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	1,044	0,0439	0,0224	-0,00787
200			1,045	0,0448	0,0393	0,0095
250			1,077	0,0769	0,0204	-0,00687
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	1,251	0,163	0,103	-0,0244
200			1,307	0,218	0,157	-0,00875
250			1,396	0,242	0,169	-0,018
150	$120 < \tau_f \leq 180$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	1,027	0,0266	0,0221	-0,00912
200			1,042	0,0424	0,0226	-0,0119
250			1,058	0,0583	0,0235	-0,0118
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	1,194	0,141	0,0845	-0,0325
200			1,260	0,176	0,116	-0,038
250			1,339	0,222	0,147	-0,0389

Примечание. Значения коэффициентов k_{h0} , k_{h1} , k_{h2} , k_{h3} для промежуточных толщин плит определяются линейной интерполяцией.

Таблица 3. – Коэффициенты k_{h12} , k_{h13} , k_{h23} , k_{h123}

t , мм	τ_f , мин	δ	k_{h12}	k_{h13}	k_{h23}	k_{h123}
150	$0 < \tau_f \leq 30$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	0,00125	0,0598	0,00125	0,00125
200			-0,00063	0,0506	-0,00062	-0,00063
250			0,00946	0,0395	0,00946	0,00946
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	0,0643	0,0748	0,0668	0,0643
200			0,0605	0,0443	0,0593	0,0605
250			0,0619	0,0676	0,0806	0,0619
150	$30 < \tau_f \leq 60$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	0,0104	-0,0211	0,00788	0,00788
200			0,00675	-0,0035	0,008	0,008
250			0,0186	0,00763	-0,00012	-0,00012
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	0,112	0,0209	-0,00038	-0,01613
200			0,14	0,0559	0,0395	0,0152
250			0,131	0,0201	0,00713	0,00738
150	$60 < \tau_f \leq 90$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	0,0198	-0,0128	0,0015	0,0015
200			0,0173	-0,0108	0,0025	0,0025
250			0,0191	-0,00537	0,000625	0,000625
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	0,0811	-0,00962	-0,0121	-0,0151
200			0,133	-0,00263	-0,0171	-0,0221
250			0,14	0,0354	0,00263	0,00138

Продолжение таблицы 3

t , мм	τ_f , мин	δ	k_{h12}	k_{h13}	k_{h23}	k_{h123}
150	$90 < \tau_f \leq 120$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	0,0224	-0,00787	0,00113	0,00113
200			0,0393	0,0095	-0,018	-0,018
250			0,0204	-0,00687	0,000625	0,000625
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	0,0584	-0,00862	-0,00537	-0,00763
200			0,078	-0,0278	-0,0313	0,00475
250			0,128	-0,00425	-0,012	-0,0133
150	$120 < \tau_f \leq 180$	$0,0 \leq \delta \leq 0,15$	0,0221	-0,00912	-0,00162	-0,00162
200			0,0226	-0,0119	0,00138	0,00138
250			0,0235	-0,0118	0,0025	0,0025
150		$0,15 < \delta \leq 0,30$	0,0403	-0,0143	-0,0135	-0,0103
200			0,0705	-0,0143	-0,0095	-0,0123
250			0,0999	-0,0154	-0,00962	-0,0146

Примечание. Значения коэффициентов k_{h12} , k_{h13} , k_{h23} , k_{h123} для промежуточных толщин плит определяются линейной интерполяцией.

Так как математическая модель с заданными краевыми условиями в системе конечно-элементного анализа Ansys Workbench имеет единственное решение, все 8 коэффициентов уравнения регрессии (9) значимы, план ПФЭ насыщен, а значит, проверка адекватности регрессионной модели не проводится [10, с. 56].

Анализ результатов ПФЭ и оценка влияния исследуемых факторов на коэффициент k_{hol} . Полученные по результатам расчета по формуле (9) зависимости k_{hol} от расстояния от нагреваемой поверхности до рассматриваемой точки (при $\delta = 0,0 \dots 0,3$) для плит толщиной 150...250 мм при доле пустот 0,4...0,6 от их объема приведены на рисунке 4.

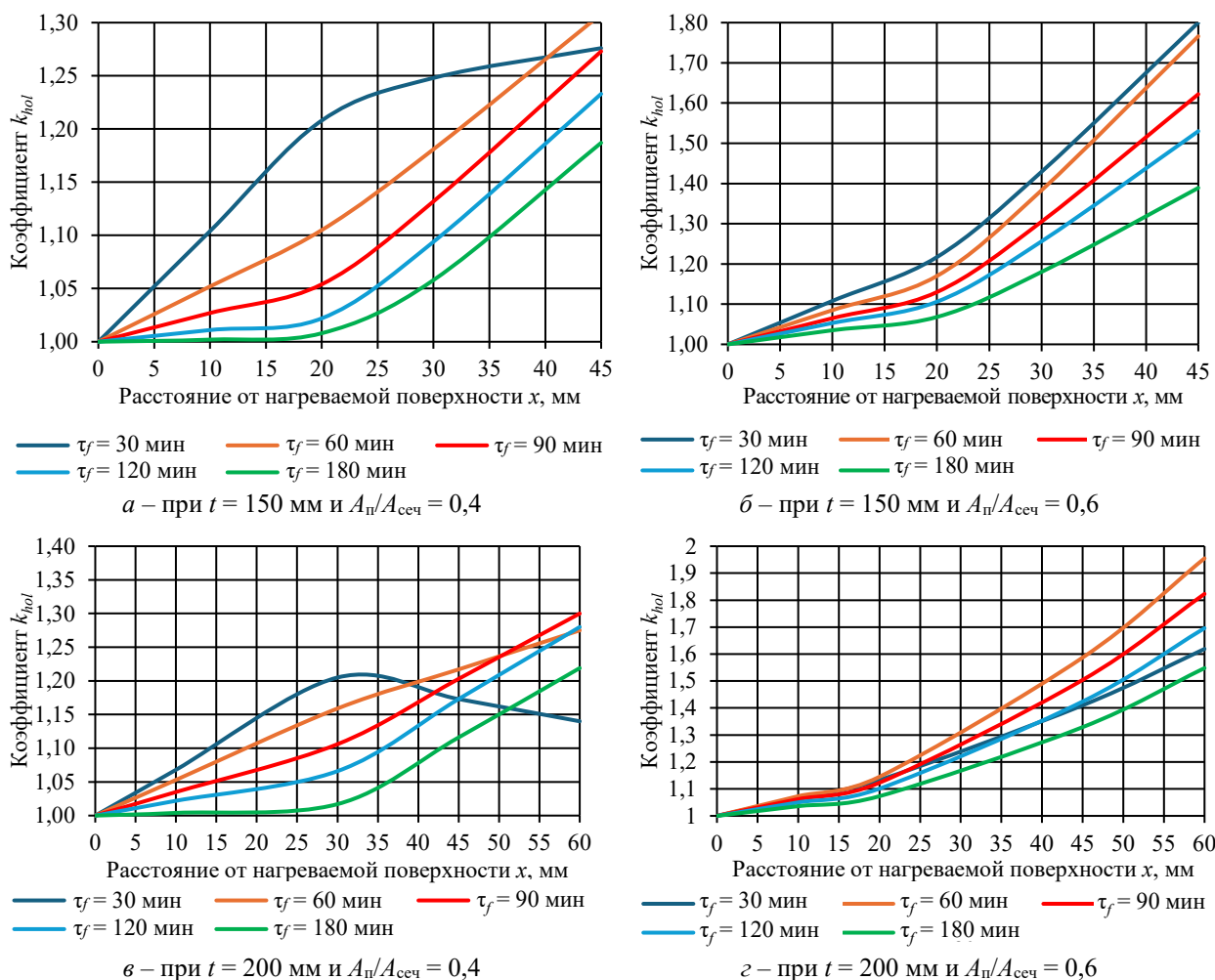


Рисунок 4. – Зависимость коэффициента k_{hol} от координаты точки x для многопустотных плит толщиной 150...250 мм при коэффициенте пустотности 0,4 и 0,6

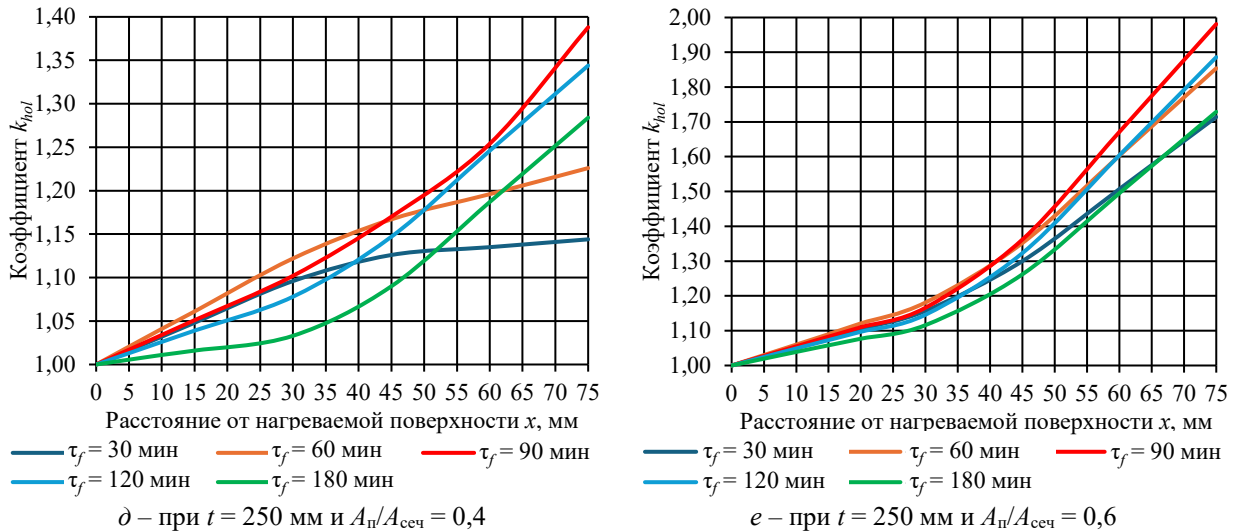


Рисунок 4. – Зависимость коэффициента k_{hol} от координаты точки x для многопустотных плит толщиной 150...250 мм при коэффициенте пустотности 0,4 и 0,6

Анализ результатов численного моделирования и значений k_{hol} показывает, что наличие симметрично расположенных (относительно центра тяжести поперечного сечения многопустотных плит) пустот круглого сечения при одностороннем нагреве в условиях стандартного температурного режима пожара приводит к повышению температуры на расстояниях от нагреваемой поверхности, соответствующих $\delta \leq 0,3$. Увеличение температуры по мере увеличения расстояния от нагреваемой поверхности в большей степени связано с увеличением объема пустот и толщины конструкции. Для плит фиксированной толщины скорость изменения k_{hol} по координате x определяется длительностью τ_f и соотношением $A_{п}/A_{сеч}$.

При прочих равных условиях минимальные значения k_{hol} фиксируются, как правило, при увеличении длительности огневого воздействия τ_f . Увеличение расстояния от нагреваемой поверхности в сторону необогреваемой приводит к увеличению k_{hol} , при этом максимальные значения коэффициента в исследуемом диапазоне смещаются к точкам с $\delta = 0,3$. Исключение составляет плита толщиной 200 мм с соотношением $A_{п}/A_{сеч} = 0,4$: для указанной конструкции локальный максимум ($k_{hol} = 1,20$) достигается спустя 30 мин стандартного огневого воздействия в точке с координатой $x \approx 30$ мм ($\delta = 0,15$). В интервале $x = 30...60$ мм ($\delta = 0,15...0,3$) при $\tau_f = 30$ мин значения коэффициента k_{hol} для указанной плиты составляют 1,15...1,20. Увеличение объема пустот в 1,5 раза для плиты толщиной 200 мм привело к получению k_{hol} (увеличению температуры) в среднем выше в 1,3 раза в точках с $\delta = 0,15$ и в 1,1 раза в точках с $\delta = 0,3$ (рис. 4а, 4г).

Для плит толщиной 150 и 250 мм с $A_{п}/A_{сеч} = 0,4$ при $\tau_f = 30$ мин пиковые значения k_{hol} соответствуют области точек ($\delta > 0,3$), находящейся за пределами границ настоящего исследования. Примечательно, что для плит толщиной 150 и 200 мм для продолжительности стандартного огневого воздействия $\tau_f = 30$ мин в точках с $\delta = 0,15$ при доле пустот 0,4 и 0,6 (от объема плиты) различие в температурах практически отсутствует (рис. 4а–4г).

Максимальные значения k_{hol} , зафиксированные в исследуемом временном интервале ($\tau_f = 30...180$ мин) для плит толщиной 150–250 мм, составили:

- при $A_{п}/A_{сеч} = 0,4$ для точек с $\delta = 0,15$: 1,15...1,22 (в интервале $\tau_f = 30...60$ мин);
- при $A_{п}/A_{сеч} = 0,4$ для точек с $\delta = 0,3$: 1,30...1,39 (в интервале $\tau_f = 60...180$ мин);
- при $A_{п}/A_{сеч} = 0,6$ для точек с $\delta = 0,15$: 1,25...1,30 (в интервале $\tau_f = 30...180$ мин);
- при $A_{п}/A_{сеч} = 0,6$ для точек с $\delta = 0,3$: 1,80...1,98 (в интервале $\tau_f = 30...180$ мин).

О пределе огнестойкости многопустотных плит по предельным состояниям Е1.

Значения коэффициента k_{hol} , определенные для многопустотных плит толщиной 150, 200 и 250 мм с долей пустот 0,4 и 0,6 от их объема (для промежуточных толщин и объеме пустот могут быть определены линейной интерполяцией), целесообразно использовать при оценке пределов огнестойкости по потере несущей способности (R). Вместе с тем данный подход применим при условии, что пределы огнестойкости по потере целостности (Е) и теплоизолирующей способности (I) не являются определяющими и не наступают до момента достижения предельного состояния R.

Результаты оценки огнестойкости многопустотных железобетонных плит с замкнутыми полостями круглого сечения по предельным состояниям EI, полученные на основе численного моделирования нагрева при пожаре, представлены в таблице 4. При этом следует отметить, что для сплошных (полнотелых) плит аналогичной толщины (150–250 мм) предел огнестойкости по предельным состояниям EI в течение 180 мин стандартного огневого воздействия не достигается.

Таблица 4. – Пределы огнестойкости многопустотных плит с замкнутыми полостями круглого сечения по предельным состояниям EI

Толщина многопустотной плиты, мм	Доля полостей круглого сечения от объема плиты	Время от начала стандартного огневого воздействия до момента достижения критических (граничных) значений температуры ¹ на необогреваемой поверхности, мин	
		В локальной точке ²	В среднем по поверхности ²
150	0,4	113	110
	0,6	55	59
200	0,4	– ³	178
	0,6	89	93
250	0,4	– ³	– ³
	0,6	105	120

Примечания.

1. Значение локальной температуры 200 °С (повышение на 180 °С по сравнению с начальной) или повышение средней температуры на необогреваемой поверхности плиты до 160 °С (повышение на 140 °С по сравнению с начальной).
2. Предел огнестойкости по предельному состоянию E принят равным пределу огнестойкости по предельному состоянию I, учитывая, что для рассматриваемых конструкций обеспечивается отсутствие хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре²⁶.
3. В течение 180 мин стандартного огневого воздействия предел огнестойкости по предельному состоянию I не достигается.

Адаптация методики расчета температурного поля для плит с пустотами. С учетом полученного уравнения регрессии для коэффициента k_{hol} и рассчитанных значений коэффициентов k_{h0} , k_{h1} , k_{h2} , k_{h3} , k_{h12} , k_{h13} , k_{h23} , k_{h123} (табл. 2 и 3) адаптированная формула (6) для определения температур в многопустотных плитах при одностороннем огневым воздействии принимает следующий вид:

$$\theta_w = \left[\theta_{w0} + 1200 \cdot (1-r)^2 \right] k_{hol}. \quad (10)$$

Далее на примере плит толщиной 200 мм с различной долей пустот выполнен расчет температур в поперечном сечении с применением упрощенного метода. Результаты расчета температур в поперечном сечении полнотелой плиты толщиной 200 мм при одностороннем воздействии стандартного температурного режима пожара по формуле (6) и многопустотных плит такой же толщины с объемом замкнутых полостей 40 и 60 % (объема плиты) по формуле (10) представлены на рисунке 5а. Сравнительные результаты численного моделирования аналогичных плит, полученные в системе конечно-элементного анализа Ansys Workbench 2020 R2, представлены на рисунке 5б.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что повышение объема пустот в железобетонных плитах приводит к росту температур в нижней, как правило растянутой, зоне конструкции. Установлено, что температурные отличия по сравнению с полнотелой плитой становятся более выраженными как с увеличением времени стандартного огневого воздействия, так и по мере удаления от нагреваемой поверхности, достигая наибольших значений на глубине, соответствующей $\delta = 0,3$ (рис. 5), что отвечает данным, представленным на рисунке 4. Превышение температуры для многопустотных плит толщиной 200 мм (по отношению к полнотелой плите такой же толщины) на расстояниях от нагреваемой поверхности 10...60 мм составили: 0,4–27,5 % при $A_{пл}/A_{сеч} = 0,4$; 3,6–95,5 % при $A_{пл}/A_{сеч} = 0,6$ (рис. 5). Температуры, рассчитанные по формуле (6) для полнотелых плит, а также температуры, рассчитанные по формуле (10) для многопустотных плит, оказываются несколько выше, чем при проведении численного моделирования с помощью Ansys Workbench 2020 R2 (рис. 5), что не снижает заложенный уровень обеспечения безопасности при решении теплотехнической задачи упрощенными методами. При этом наиболее существенные различия характерны для продолжительности стандартного огневого воздействия 120–180 мин в точках с координатой $x = 0,3 t$. Таким образом, введение коэффициента k_{hol} позволило адаптировать

²⁶ См. сноску 4.

методику приложения Ж ТКП 45-2.02-110²⁷ для расчета температур в растянутой зоне (на глубине, не превышающей 0,3 толщины конструкции) многопустотных плит толщиной от 150 до 250 мм с объемом замкнутых полостей круглого сечения от 40 до 60 % (объема плиты).

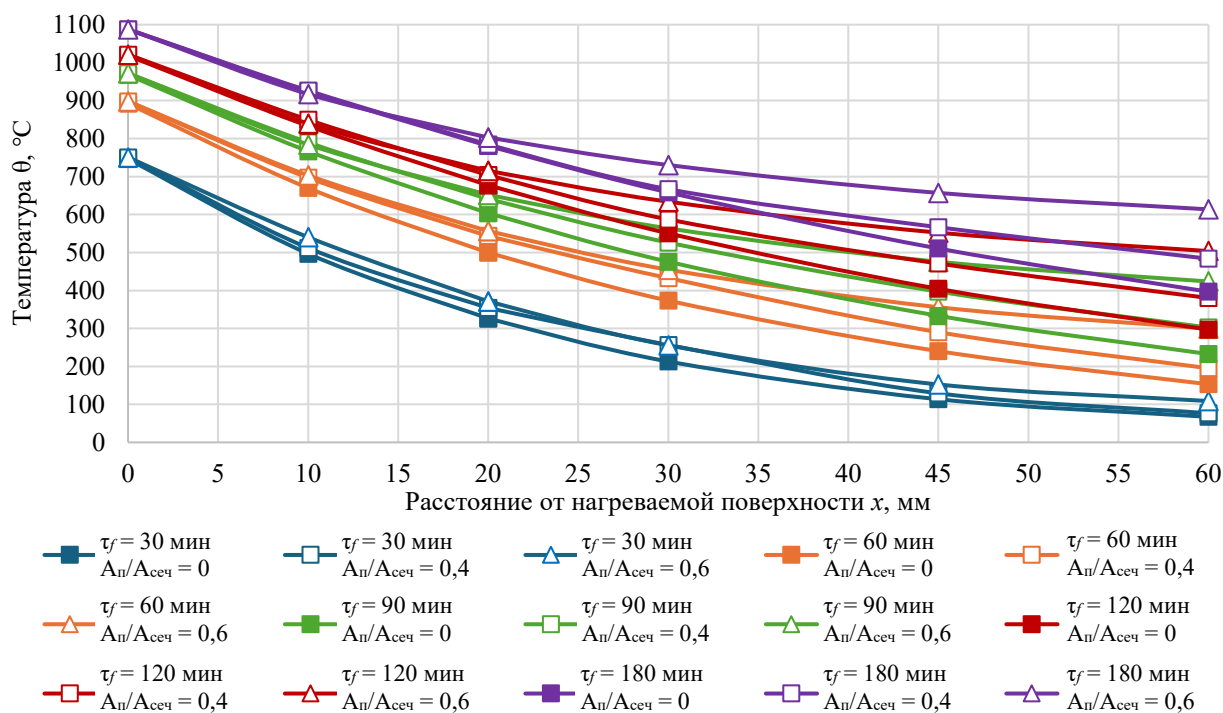
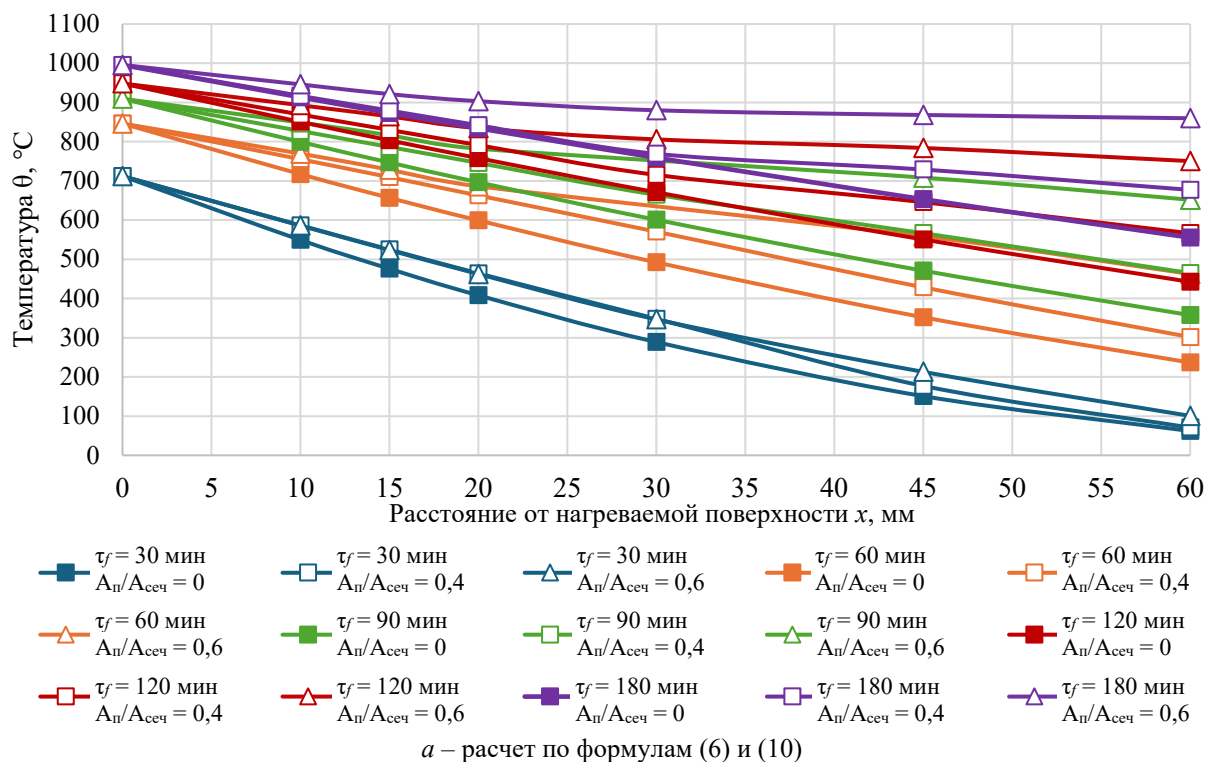


Рисунок 5. – Распределение температур в железобетонных плитах толщиной 200 мм (на относительных расстояниях от нагреваемой поверхности $\delta = 0 \dots 0,3$)

²⁷ См. сноску 4.

Заключение

В ходе теоретических исследований, основанных на результатах численного моделирования (с применением системы конечно-элементного анализа Ansys Workbench 2020 R2) нагрева полнотелых и многопустотных (с замкнутыми полостями круглого сечения, составляющими 40 и 60 % от общего объема конструкции) железобетонных плит толщиной 150–250 мм при одностороннем воздействии стандартного температурного режима пожара для указанных плит получены следующие результаты:

1. Построены расчетные модели нагрева железобетонных плит, включающие задание начальных и граничных условий теплообмена, зависимостей теплофизических свойств бетона от температуры, параметров конечных элементов. Получено распределение температур в поперечном сечении полнотелых и многопустотных железобетонных плит при воздействии стандартного температурного режима пожара продолжительностью от 30 до 180 мин.

2. Получено уравнение регрессии для коэффициента k_{hol} , учитывающего увеличение температуры в заданной точке поперечного сечения многопустотной плиты по отношению к полнотелой. Коэффициент учитывает влияние следующих факторов: расстояние от нагреваемой поверхности до рассматриваемой точки поперечного сечения плиты, ее толщину, долю поперечного сечения, занимаемую пустотами, и продолжительность одностороннего стандартного огневого воздействия. Построены зависимости коэффициента k_{hol} от координаты точки (на расстоянии не более 0,3 толщины конструкции от нагреваемой поверхности) для многопустотных плит при продолжительности одностороннего стандартного огневого воздействия 30, 60, 90, 120 и 180 мин.

3. Установлено, что в растянутой зоне многопустотных плит (на глубине до 0,3 толщины конструкции) значение коэффициента k_{hol} возрастает по мере удаления от нагреваемой поверхности. Увеличение продолжительности стандартного огневого воздействия при прочих равных условиях приводит к снижению значений k_{hol} . Установлено, что в многопустотных плитах толщиной от 150 до 250 мм с долей пустот 0,4 от их объема температура на расстоянии от нагреваемой поверхности от 0,15 до 0,3 ее толщины на 15–39 % выше, чем в полнотелых плитах, при доле пустот 0,6 – на 25–98 %.

4. Оценены пределы огнестойкости по потере целостности и теплоизолирующей способности многопустотных плит. Критерием для наступления предельного состояния служило превышение температуры на 140 °С в среднем или на 180 °С в любой точке на необогреваемой поверхности относительно начальной температуры (при условии отсутствия хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре). Для плит толщиной 150 мм предел огнестойкости по указанным предельным состояниям составляет 55 мин при 60 % пустот и 110 мин при 40 % пустот, для плит толщиной 200 мм – 89 мин при 60 % пустот и 178 мин при 40 % пустот, для плит толщиной 250 мм – 105 мин при 60 % пустот и не менее 180 мин при 40 % пустот, для сплошных плит толщиной от 150 до 250 мм в течение 180 мин не достигается.

5. Адаптирована с помощью коэффициента k_{hol} формула для расчета температур в поперечном сечении (в зоне, расположенной на расстоянии 0...0,3 толщины конструкции от нагреваемой поверхности) многопустотных плит толщиной 150–250 мм, подвергаемых одностороннему воздействию стандартного температурного режима. Проведенный анализ температур в поперечном сечении многопустотных плит толщиной 200 мм, полученных по адаптированной формуле, показал возможность ее применения в инженерной практике в рамках упрощенных методов расчета огнестойкости.

Полученные результаты могут быть использованы специалистами проектных, экспертных и научных организаций при оценке огнестойкости многопустотных железобетонных плит упрощенными методами расчета, а также при корректировке технических нормативных правовых актов в части расширения области применения действующей методики теплотехнического расчета железобетонных и бетонных конструкций (ТКП 45-2.02-110).

ЛИТЕРАТУРА

1. Батяновский, Э.И. Технология бетонных и железобетонных изделий: учеб. пособие / Э.И. Батяновский. – Мн.: Высшая школа, 2017. – 305 с.
2. Соколов, С.В. Оценка обстановки с пожарами в мире / С.В. Соколов, П. Вагнер // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33, № 6. – С. 67–84. – DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.67-84. – EDN: VYWRYO.

3. Королев, Д.С. Огнестойкость как базовый элемент системы противопожарной защиты зданий и сооружений / Д.С. Королев, Е.А. Бондаренко // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 423–425. – EDN: YQIGQP.
4. Зайцев, А.М. Численное моделирование прогрева строительных конструкций для определения коэффициента теплоотдачи при пожарах / А.М. Зайцев, В.А. Болгов // *Вестник Воронежского института ГПС МЧС России*. – 2015. – № 1 (14). – С. 19–26. – EDN: TSVNLR.
5. Полевода, И.И. Решение теплотехнической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2021. – Т. 30, № 2. – С. 49–70. – DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.49-70. – EDN: ONYDWP.
6. Ba, G. Influence of cracking on heat propagation in reinforced concrete structures / G. Ba, J. Miao, W. Zhang, C. Liu // *Journal of Structural Engineering*. – 2016. – Vol. 142, No. 7. – Article 04016035. – 11 p. – DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001483.
7. Ширко, А.В. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием программы среды ANSYS / А.В. Ширко, А.Н. Камлюк, И.И. Полевода Н.В. Зайнудинова // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2013. – № 2 (18). – С. 260–269. – EDN: SNFAML.
8. Полевода, И.И. Огнестойкость железобетонных колонн с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, С.М. Жамойдик, Д.С. Нехань // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. – 2022. – № 2. – С. 67–81. – DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81. – EDN: OВMPXF.
9. Ройтман, М.Я. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / М.Я. Ройтман. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.
10. Гринфельд, Г.М. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: конспект лекций / Г.М. Гринфельд, А.В. Моисеев. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – 76 с. – ISBN 978-5-7765-1102-8.

**Инженерная методика расчета температурного поля в поперечном сечении
многopустотных железобетонных плит при стандартном пожаре**
**Engineering method for calculating the temperature field in the cross-section of hollow-core
reinforced concrete slabs under a standard fire**

Нехань Денис Сергеевич

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: denis_nechany@mail.ru
SPIN-код: 3773-9964

Denis S. Nekhan'

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
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, Minsk, Belarus
Email: denis_nechany@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7838-4663

Левданский Алексей Александрович

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: lvdanskj355@mail.ru

Aleksey A. Levdanskiy

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: lvdanskj355@mail.ru
ORCID: 0009-0008-2391-3407

ENGINEERING METHOD FOR CALCULATING THE TEMPERATURE FIELD IN THE CROSS-SECTION OF HOLLOW-CORE REINFORCED CONCRETE SLABS UNDER A STANDARD FIRE

Nekhan' D.S., Levdanskiy A.A.

Purpose. To develop an engineering methodology for calculating the temperature field in the cross-section of hollow-core reinforced concrete slabs (150–250 mm thick) with symmetrically located (relative to the center of gravity) closed circular hollows (40 to 60 % volume) under unilateral standard fire exposure. This methodology is based on adapting a simplified solution to the nonlinear heat conduction equation for solid slabs using correction factors obtained through numerical modeling and taking into account the cross-sectional geometry, point coordinates, and heating duration.

Methods. Numerical modeling of heating of reinforced concrete slabs during a standard fire using the finite element method based on the design of a full factorial experiment. This study summarizes the modeling results and analyzes the influence of the geometric parameters of cross-section of the hollow-core slabs and the duration of standard fire exposure on the temperature field generated within the slabs. An existing methodology for calculating the temperature field in solid slabs exposed to a standard fire is adapted for application to hollow-core slabs.

Findings. The influence of the geometric parameters of hollow-core reinforced concrete slabs (thickness, volume of enclosed circular cavities) on the temperature field dynamics in the cross-section (at a depth of up to 0.3 of the structure's thickness) under unilateral standard fire exposure lasting from 30 to 180 minutes was determined. A regression equation was derived for determining the k_{hol} coefficient, which accounts for the temperature increment at a given distance from the heated surface in hollow-core slabs compared to their solid counterparts under unilateral standard fire exposure. An engineering methodology for assessing the temperature field in hollow-core reinforced concrete slabs (150–250 mm thick with a volume of enclosed circular hollows of 40–60 %) under standard fire exposure was developed.

Application field of research. The research results can be used by specialists on design, expert, and scientific organizations to solve simplified heat engineering problems of fire resistance for hollow-core reinforced concrete slabs, as well as to improve existing regulatory legal acts.

Keywords: hollow-core reinforced concrete slabs, standard fire temperature regime, fire resistance, numerical modeling, full factorial experiment, heat engineering problem, Ansys Workbench, void ratio.

(The date of submitting: January 8, 2026)

REFERENCES

1. Batyanovskiy E.I. *Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy* [Technology of concrete and reinforced concrete products]: tutorial. Minsk: Vysshaya shkola, 2017. 305 p. (rus)
2. Sokolov S.V., Vagner P. Otsenka obstanovki s pozharami v mire [Assessment of the fire situation in the world]. *Fire and Explosion Safety*, 2024. Vol. 33, No. 6. Pp. 67–84. (rus). DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.67-84. EDN: VYWRYO.
3. Korolev D.S., Bondarenko E.A. Ognestoykost' kak bazovyy element sistemy protivopozharnoy zashchity zdaniy i sooruzheniy [Fire resistance, as a basic element of the fire-fighting protection systems for buildings and facilities]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy*, 2018. Vol. 1, No. 9. Pp. 423–425. (rus). EDN: YQIGQP.
4. Zaytsev A.M., Bolgov V.A. Chislennoe modelirovanie progrena stroitel'nykh konstruktsiy dlya opredeleniya koeffitsienta teplootdachi pri pozharakh [Numerical modeling heating construction for determining heat transfer coefficient in case of fire]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii*, 2015. Vol. 1, No. 14. Pp. 19–26. (rus). EDN: TSVNLR.
5. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Reshenie teplotekhnicheskoy zadachi ognestoykosti tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn [A solution to the thermal problem of fire resistance of spun reinforced concrete columns]. *Fire and Explosion Safety*, 2021. Vol. 30, No. 2. Pp. 49–70. (rus). DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.49-70. EDN: ONYDWP.
6. Ba G., Miao J., Zhang W., Liu C. Influence of cracking on heat propagation in reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 2016. Vol. 142, No. 7. Article 04016035. 11 p. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001483.
7. Shirko A.V., Kamlyuk A.N., Palevoda I.I., Zaynudinova N.V. Teplotekhnicheskiiy raschet ognestoykosti elementov zhelezobetonnykh konstruktsiy s ispol'zovaniem programmoy sredy ANSYS [Thermal engineering calculation of fire resistance of reinforced concrete structure elements using the ANSYS

- environment program]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2013. No. 2 (18). Pp. 260–269. (rus). EDN: SNFAML.
8. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S. Ognestoykost' zhelezobetonnykh kolonn s konstruktivnoy ognenezashchitoy [Fire resistance of reinforced concrete columns with structural fire retardance]. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2022. No. 2. Pp. 67–81. (rus). DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81. EDN: OBMPXF.
 9. Roytman V.M. *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemykh i rekonstruiruemykh zdaniy* [Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow: Association «Pozharnaya bezopasnost' i nauka», 2001. 382 p. (rus)
 10. Grinfel'd G.M., Moiseev A.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii* [Methods for optimizing experiments in chemical technology]: lecture notes. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-Amure State University, 2014. 74 p. (rus). ISBN: 978-5-7765-1102-8.

Copyright © 2026 Nekhan' D.S., Levdanskiy A.A.

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

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЫХАТЕЛЬНОГО АППАРАТА СО СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ НА СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ЛЕГОЧНОГО АВТОМАТА

Лавич В.В., Морозов А.А., Козлов Е.А., Шатилов Ю.С., Аниськов В.И.

Цель. Экспериментально оценить влияние различных условий эксплуатации дыхательного аппарата со сжатым воздухом на стабильность работы легочного автомата дыхательного аппарата со сжатым воздухом.

Методы. Эмпирические методы исследования включали эксперимент и измерение. Теоретические методы были представлены анализом и обобщением литературных источников, а также статистической обработкой и обобщением полученных экспериментальных данных.

Результаты. На основании проведенных эксплуатационных испытаний установлено, что снижение температуры окружающей среды (до $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$) в условиях повышенной влажности и имитации воздействия водяного аэрозоля (тушение) приводит к возникновению усилия на вдох. При повышении интенсивности работы процесс дыхания становится более сложным ввиду повышения количества потребляемого воздуха, а в отдельных случаях – невозможным. Основной причиной отказа является обледенение седла и тарелки клапана вдоха, приводящее к их механическому залипанию и полной блокировке подачи воздуха в подмасочное пространство, а также к нарушению непрерывности подачи воздуха в подмасочное пространство.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы Министерством по чрезвычайным ситуациям при разработке рекомендаций по безопасной эксплуатации дыхательных аппаратов в условиях низких температур: контроль и профилактика обледенения, действия при первых признаках увеличения сопротивления дыханию.

Ключевые слова: дыхательный аппарат на сжатом воздухе, легочный автомат, обледенение, низкие температуры, надежность, пожарная безопасность.

(Поступила в редакцию 9 января 2026 г.)

Введение

Анализ оперативных данных показывает, что в Республике Беларусь ежегодно регистрируется свыше 5 тысяч пожаров, при ликвидации порядка 40 % из которых (около 2 тысяч) применяются аппараты со сжатым воздухом (АСВ), что обеспечивает спасение более 200 человеческих жизней. АСВ являются основным средством индивидуальной защиты органов дыхания и зрения спасателей при работе в непригодной для дыхания среде. Надежность АСВ в экстремальных условиях является ключевым фактором безопасности как самого спасателя, так и людей, которых он спасает^{1, 2}.

Актуальность изучения конкретных эксплуатационных проблем АСВ определяется также структурой оснащения средствами индивидуальной защиты. В настоящее время на вооружении органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям (далее – ОПЧС) находится более 9000 дыхательных аппаратов различных производителей, включая ведущие зарубежные (Drager, MSA Auer, Scott) и отечественный – БДА. Количественный анализ показывает, что наибольшую долю составляют аппараты Drager – порядка половины всех имеющихся АСВ (50 %), а отечественные БДА – около четверти (25 %). Соответственно, на эти аппараты приходится совокупно примерно 75 % от общего количества имеющихся в ОПЧС. Таким образом, в качестве объектов исследования были выбраны АСВ именно этих двух производителей. Также в качестве опытного образца Научно-исследовательским институтом пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Университета гражданской защиты

¹ Техника пожарная. Аппараты дыхательные со сжатым воздухом с открытым циклом дыхания. Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ Р 53255-2019. – Введ. 01.02.2020. – М.: Стандартинформ. – IV, 40 с.

² Система стандартов пожарной безопасности. Средства индивидуальной защиты пожарных. Аппараты дыхательные со сжатым воздухом. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.14.03-2008. – Введ. 01.06.2009. – М.: Стандартинформ. – III, 39 с.

(далее – НИИ ПБиЧС) были представлены дыхательные аппараты со сжатым воздухом, оборудованные системой телеметрии MTS RHZK Series, производства Китайской Народной Республики. Это дыхательные аппараты, в которых в качестве манометра используется многофункциональный модуль, выполняющий функции манометра, датчика неподвижного состояния, датчика температуры окружающей среды, тепловизора, фонарика и оснащенный жидкокристаллическим дисплеем.

При проведении экспериментального исследования сфокусировались на принципах работы и конструктивных особенностях АСВ, которые влияют на его работоспособность и в конечном счете – на результат проведения аварийно-спасательных работ.

Все аппараты выполнены по открытой (незамкнутой) схеме с выдохом в атмосферу. На рисунке 1 представлена принципиальная схема устройства АСВ, который работает следующим образом: при открытии вентиля воздух под высоким переменным давлением поступает из баллона в редуктор, в котором давление понижается до постоянно низкого (редуцированного). В случае нарушения работы редуктора и, как следствие, повышения редуцированного давления воздуха срабатывает предохранительный клапан. Из полости редуктора воздух по воздухопроводному шлангу поступает в легочный автомат и к разъему, к которому подсоединяется спасательное устройство. При вдохе воздух из полости легочного автомата через промежуточный клапан поступает в полость лицевой маски. При этом происходит обдув панорамного стекла лицевой части, что исключает его запотевание. Для выхода воздуха в атмосферу открывается клапан выдоха, расположенный в клапанной коробке. Пружина поджимает клапан выдоха с усилием, позволяющим поддерживать в подмасочном пространстве лицевой части заданное избыточное давление. Для контроля запаса воздуха в баллоне воздух из полости редуктора поступает в манометр. При исчерпании рабочего запаса воздуха в баллоне открывается клапан сигнального устройства. При этом издается непрерывный звуковой сигнал, предупреждая о необходимости немедленного выхода в безопасную зону [1].

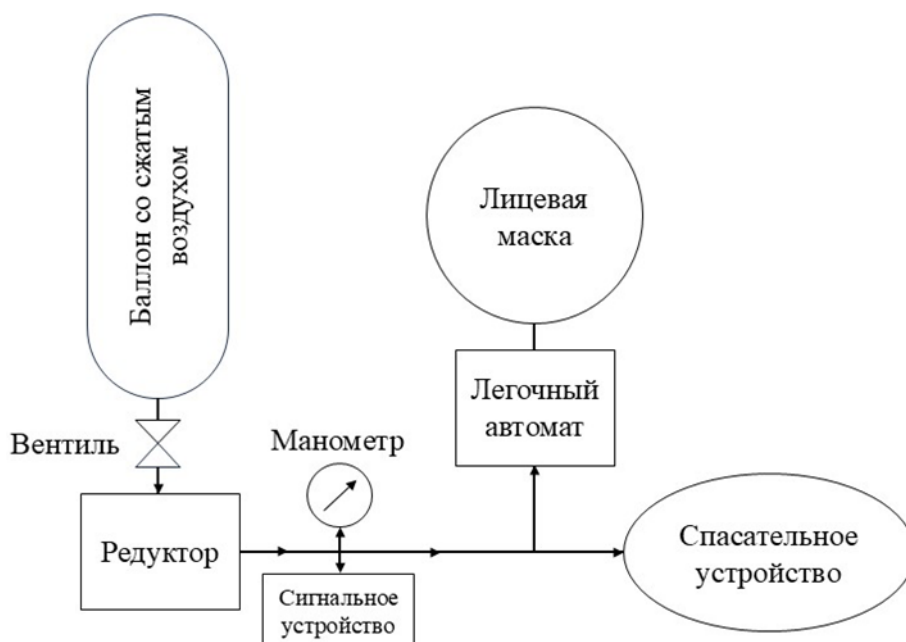


Рисунок 1. – Схема устройства дыхательного аппарата со сжатым воздухом

Особого внимания заслуживает эксплуатация АСВ в условиях низких температур, характерных для пожаров в осенне-зимний и весенний периоды [2]. При расширении сжатого воздуха в редукторе и легочном автомате (рис. 2) происходит его адиабатическое охлаждение [3; 4]. В условиях высокой влажности (характерной для помещений при тушении пожара, а также во время выпадения осадков в виде дождя и снега) и отрицательных температур окружающей среды это может привести к конденсации и последующему замерзанию паров воды на деталях легочного автомата (ЛА) [4]. Обледенение подвижных элементов (мембран, клапанов) может вызвать их залипание, неполное открытие или закрытие, что влечет либо резкое увеличение сопротивления дыханию (или прекращение подачи воздуха), либо неконтролируемую подачу воздуха (самоподдув), ведущую к быстрому израсходованию запаса воздуха [5].

Существует проблема в отсутствии данных, описывающих динамику процесса отказа легочного автомата: от начального охлаждения и конденсации влаги до фазы обледенения и полной блокировки подачи воздуха. Особенно актуально это для конкретных моделей, применяемых в ОПЧС АСВ, при работе в условиях, комплексно моделирующих не только низкую температуру, но и основные сопутствующие факторы реального пожара: высокую влажность и прямое воздействие воды при тушении, а также высокую физическую нагрузку на спасателя.



а – Drager Plus LDV P Short (PSS-A)



б – AutoMaXX-AE (MSA Safety Incorporated)



в – MTS RHZK

Рисунок 2. – Общий вид легочных автоматов, применяемых в АСВ Drager, БДА и MTS соответственно

Для решения данной проблемы нами проведены натурные эксплуатационные испытания АСВ выбранных производителей (Drager, БДА и MTS). При этом для получения объективных результатов является не просто выполнение различных тестов и апробаций работы аппаратов разработана методика эксплуатационных испытаний, которая включает:

1. Определение критериев и параметров моделирования экстремальной среды (температурные режимы, уровень влажности, интенсивность обливания АСВ).
2. Определение уровней физической нагрузки, реально отражающих работу спасателей в условиях ЧС.
3. Установление перечня контролируемых параметров (время работы АСВ, давление воздуха в баллоне, количество циклов заправки баллона (замена баллонов), визуальные признаки обледенения, субъективные оценки испытателя) и протокол их фиксации.
4. Четкое определение критериев отказа (например, превышение нормативного усилия вдоха, полная блокировка либо неконтролируемая постоянная подача воздуха), что позволит количественно оценивать время наработки на отказ в заданных условиях.

Разработка и применение подобной методики позволят не только детально исследовать физику процесса обледенения в работающем аппарате, но и провести сравнительный анализ устойчивости различных моделей АСВ, выявить их конструктивные недостатки и в итоге сформулировать конкретные рекомендации по обеспечению работоспособности ЛА [6; 7]. Таким образом, создание методологической базы для испытаний является первым и необходимым шагом в решении комплексной проблемы обеспечения безопасности спасателей при работе в условиях отрицательных температур [5].

Основная часть

В качестве объектов исследования выступили серийные дыхательные аппараты: модели Drager PA94 Plus Basic (3 ед.), БДА-СЛ (3 ед.) и MTS RHZK Series (3 ед.). Испытания проводились в осенне-зимний период (ноябрь – декабрь) на базе Университета гражданской защиты (УГЗ). Среднесуточная температура воздуха составляла от -3 до +10 °С. В исследовании приняли участие обучающиеся университета дневной формы обучения в возрасте до 25 лет.

Перечень экспериментального оборудования и средств измерения представлен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Экспериментальное оборудование

Наименование	Характеристика
АСВ Drager PA94 Plus Basic	рабочее давление, МПа, – 29,4; редуцированное давление, МПа, – 0,65–1; избыточное давление в подмасочном пространстве, Па, – 100–390
АСВ БДА-СЛ	рабочее давление, МПа, – 29,4; редуцированное давление, МПа, – 0,5–0,9; избыточное давление в подмасочном пространстве, Па, – 250–390
АСВ MTS RHZK Series	рабочее давление, МПа, – 30; редуцированное давление, МПа, – 0,8–1,1; избыточное давление в подмасочном пространстве, Па, – 250–390
Баллон стальной для сжатого воздуха R-EXTRA-5/PTS	рабочее давление, МПа, – 29,4; емкость, л, – 6,8; масса баллона с вентилем, кг, – 8,2; температурный диапазон эксплуатации, °С, – от -50 до +65

Таблица 2. – Средства измерений

Наименование	Диапазон измерений	Цена деления	Погрешность
Секундомер Интеграл С-02	0 ч 00 мин 00 с – 9 ч 59 мин 59,99 с	0,01 с	$\pm (9,6 \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{изм}} + 0,01 \text{ с})$

Примечание. Средства измерений внесены в государственный реестр средств измерений Республики Беларусь³ и на период проведения исследований имели действующие аттестаты, свидетельства о поверке и/или калибровке. Условия проведения исследований соответствовали условиям эксплуатации измерительного оборудования.

Для определения степени воздействия физической нагрузки на организм испытуемых в период выполнения упражнений использовались кардиомониторы Polar RX800CX (монитор сердечного ритма RS800CX, датчик частоты сердечных сокращений H3, инфракрасный адаптер IrDA USB для передачи данных с кардиомонитора на компьютер, программное обеспечение Polar ProTrainer 5).

Целью методики проведения эксплуатационных испытаний являлось моделирование комплекса нагрузок, характерных для реальной работы спасателей, для оценки работоспособности легочного автомата. Программа тренировок включала два взаимосвязанных блока упражнений, выполняемых испытуемыми в полном комплекте боевой одежды и снаряжения.

Блок А. Воздействие на АСВ условий, имитирующих опасные факторы пожара (рис. 3):

1. Интенсивное увлажнение: перед включением аппараты подвергались воздействию распыленной струи воды или 6 %-го раствора пенообразователя (ПО) в течение 180 с с дистанции 5 м по следующему циклу: 1-й день – обливание водой, 2-й день – обливание не проводилось, 3-й день – обливание раствором ПО, 4-й день – обливание не проводилось и т.д.

2. Низкотемпературное кондиционирование: методика включала использование АСВ после охлаждения в течение не менее 4 ч при температуре -10 °С и влажности 75 %. Для этого этапа использовалась климатическая камера ТМАХ-1000 с диапазоном температур от -20 до +100 °С и контролем влажности. Предварительное охлаждение проводилось ежедневно в течение 30 дней. Суммарное время нахождения дыхательных аппаратов в этой камере составило около 200 ч. По истечении времени пребывания АСВ в камере испытуемый в полной экипировке приступал к выполнению упражнений блока Б.

³ Государственный реестр средств измерений (стандартных образцов) Республики Беларусь // Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – URL: [https://oei.by/grsi?GrsiSearch\[grsi_status\]=1](https://oei.by/grsi?GrsiSearch[grsi_status]=1) (дата обращения: 14.10.2025).



а – обливание АСВ



б – низкотемпературное кондиционирование

Рисунок 3. – Воздействие агрессивных условий эксплуатации

Блок Б. Базовые и силовые упражнения (рис. 4):

1. Боевое развертывание от автоцистерны (выполнение контрольных нормативов), сбор пожарно-технического вооружения (ПТВ).
2. Ориентирование на чистом воздухе в АСВ.
3. Подъем и спуск по лестничным маршам.
4. Работа с аварийно-спасательным инструментом и оборудованием.
5. Бег в легком темпе, прыжки на месте, транспортировка пострадавшего вдвоем.
6. Работа в модульном учебно-тренировочном комплексе (МУТК): передвижение в условиях ограниченной видимости, тепловое воздействие (температура в диапазоне 40–50 °С), поиск и транспортировка условного пострадавшего (манекена).



а – боевое развертывание и сбор ПТВ



б – ориентирование на чистом воздухе



в – подъем и спуск по лестничным маршам



г – работа в МУТК

Рисунок 4. – Комплекс физических упражнений

7. Работа в стесненных условиях: преодоление лабиринта и различных препятствий, где требовалось передвигаться с АСВ в руках, что обеспечивало постоянный механический контакт и перегибы шлангов АСВ [8].

Общая последовательность одного цикла испытаний для каждого аппарата: выполнялось обливание, либо кондиционирование, либо комплексное воздействие обеих процедур (обливание после кондиционирования), далее – выполнение упражнений (блок Б), после окончания цикла выполнялась заправка баллона либо его замена. Для каждого аппарата проведено порядка 300 таких полных циклов.

Для объективной оценки соответствия нагрузки категории «очень тяжелая» (частота сердечных сокращений (ЧСС) ≥ 151 уд/мин) с помощью нагрудных пульсометров Polar H3 контролировалась ЧСС испытуемых (рис. 5). Осуществлялся визуальный контроль за состоянием АСВ и субъективная оценка самочувствия испытуемых. При этом испытуемые опрашивались через каждые 10 мин после включения в дыхательный аппарат.

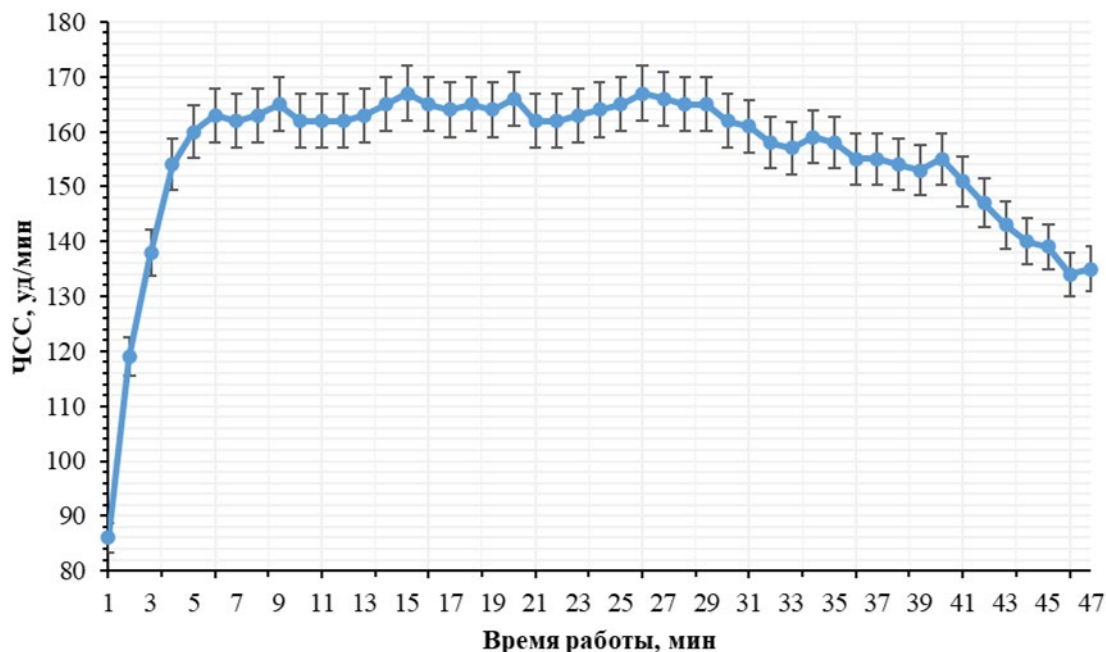


Рисунок 5. – Изменение ЧСС при выполнении комплекса упражнений

Критерием отказа считалось: неконтролируемая постоянная подача воздуха и невозможность совершения вдоха.

В ходе опытной эксплуатации руководителем испытаний велся журнал учета работы АСВ. В нем отражены: вид тренировки, фактическое время работы, факты заправки, обливание водой, неисправности, возникающие в процессе эксплуатации, и другие события, происходящие с АСВ в процессе эксплуатации, влияющие на его работоспособность. По итогам проведенного исследования подготовлен отчет.

Продолжительность исследований составила 2 месяца. За этот период проведено около 300 включений в каждый АСВ с полным расходом запаса воздуха в баллоне. В каждом АСВ в среднем было наработано порядка 10 000 мин. Среднее время работы АСВ составляло 35 мин – это соответствует легочной вентиляции более 60 л/мин. Потребление воздуха и показания ЧСС свидетельствуют о проведении работ по степени тяжести: тяжелая – очень тяжелая (табл. 3).

Таблица 3. – Влияние степени тяжести работы на организм человека

Виды работы по степени тяжести	Частота сердечных сокращений, уд/мин	Потребление воздуха, л/мин
Легкая	85–100	12,5
Средняя	101–125	30
Тяжелая	126–150	60
Очень тяжелая	151–170	80

В ходе исследования было зафиксировано 7 случаев полного отказа – это 0,26 % от общего количества включений (2700 раз) при 90 000 мин общей наработки испытываемых АСВ. Из них 4 случая, связанных с обледенением клапана ЛА, произошли исключительно при выполнении упражнений в АСВ MTS RHZK Series после обливания водой. Остальные 3 – единичные случаи: 1 – при работе в АСВ Drager PA94 Plus Basic (неконтролируемая постоянная подача воздуха), 2 – при работе в АСВ БДА-СЛ (невозможность совершения вдоха при наличии воздуха в баллоне) (рис. 6).



а – внешний вид



б – вид изнутри

Рисунок 6. – Обледенение легочного автомата

Полученные результаты подтверждают гипотезу о возможном обледенении ЛА в условиях, максимально приближенных к реальным. Зафиксированные факты не свидетельствуют о постоянном и систематическом появлении данных неисправностей. Ключевым практическим выводом является то, что само по себе нахождение в холодной среде не является достаточным условием для отказа. Отказ является следствием строгой последовательности: тяжелая физическая работа после кондиционирования и интенсивного увлажнения (обливание АСВ водой и раствором пенообразователя).

Разработанная программа испытаний успешно демонстрирует зависимость между увлажнением, охлаждением и отказом в работе ЛА, что делает ее эффективным инструментом для оценки различных моделей и конструктивных решений. Выявленные замечания указывают на то, что проблема имеет конструктивную основу, связанную с недостаточной герметичностью легочного автомата АСВ MTS RHZK Series.

Заключение

В ходе проведения натурных эксплуатационных испытаний апробирована разработанная методика, провоцирующая отказ в работе легочного автомата в контролируемых условиях. Критическим звеном методики является комбинация этапов низкотемпературной выдержки, интенсивного увлажнения и последующей работы в АСВ. Высокая физическая нагрузка (бег, подъем по лестнице и работа в стесненных условиях) приводит к повышенному потреблению воздуха, что вызывает его адиабатическое охлаждение при расширении, а выполнение данных видов работ после тушения (обливания) при низких температурах способно привести к отказу в работе ЛА. Выявлена значимая разница в стойкости к обледенению между исследованными моделями АСВ, что указывает на их конструктивные различия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаковский, Б.Л. Пожарная аварийно-спасательная техника и связь: учебник: в 2 ч. / Б.Л. Кулаковский [и др.]. – Мн.: РЦСиЭ МЧС, 2012. – Ч. 1. – 421 с.
2. Долгих, Е.С. Вопросы применения средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения в условиях отрицательных температур / Е.С. Долгих, И.В. Сараев, А.Г. Бубнов // Пожарная и аварийная безопасность: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 90-й годовщине образования гражданской обороны, Иваново, 24 ноября 2022 г. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 354–361. – EDN: VXLMJQ.
3. Стоянов Н.И. Теоретические основы теплотехники (техническая термодинамика и тепломассообмен): учеб. пособие / Н.И. Стоянов, С.С. Смирнов, А.В. Смирнова. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2014. – 226 с. – EDN: ZGJQUD.

4. Копачев, В.Ф. Термодинамика, теплопередача и гидравлика: учебник / В.Ф. Копачев. – 2-е изд. – Саратов, Москва: Профобразование, Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 250 с. – EDN: SITNGC.
5. Кириллов, В.Ф. Обзор результатов производственных испытаний средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) / В.Ф. Кириллов, А.С. Филин, А.В. Чиркин // Токсикологический вестник. – 2014. – № 6 (129). – С. 44–49. – EDN: ZCOSBT.
6. Долгих, Е.С. Сравнительная оценка отечественных марок СИЗОД по статистическим показателям работы функциональных элементов в процессе эксплуатации / Е.С. Долгих, А.Г. Бубнов // Безопасность жизнедеятельности. – 2025. – № 3 (291). – С. 15–20. – EDN: ZWHQAF.
7. Логинов, В.И. Требования и методы испытаний средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения пожарных в российских и европейских стандартах / В.И. Логинов, Ю.Н. Маслов, Р.А. Кисляков, И.А. Карпова // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 6. – С. 56–62. – DOI: 10.24000/0409-2961-2024-6-56-62. – EDN: BEMFGF.
8. Белизов, М.Д. Подготовка газодымозащитника: учеб. пособие / М.Д. Белизов, А.В. Малыхин. – Иркутск: Восточно-Сибирский институт МВД России, 2011. – 108 с. – EDN: WHSODZ.
9. Аганов, С.С. Физическая и профессиональная подготовка обучающихся в системе МЧС России: учеб. пособие: в 2 т. / С.С. Аганов, А.Э. Болотин, М.Т. Лобжа [и др.]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. – Т. 1. – 480 с. – EDN: OFVVG1.

Влияние различных условий эксплуатации дыхательного аппарата со сжатым воздухом на стабильность работы легочного автомата

Influence of various operating conditions of a compressed air breathing apparatus on the stability of the lung demand valve

Лахвич Вячеслав Вячеславович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», факультет предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, начальник факультета

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

Email: slavaspec@rambler.ru

SPIN-код: 5450-0192

Vyacheslav V. Lakhvich

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

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

Email: slavaspec@rambler.ru

ORCID: 0000-0001-7601-305X

Морозов Артем Александрович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной аварийно-спасательной техники, начальник кафедры

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

Email: morozov@ucpminsk.ru

SPIN-код: 7482-7284

Artem A. Morozov

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 Rescue Equipment, Head of the Chair

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

Email: morozov@ucpminsk.ru

ORCID: 0000-0001-8079-2578

Козлов Евгений Анатольевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной аварийно-спасательной техники, старший преподаватель

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

Email: zenka.2012@mail.ru

Evgeniy A. Kozlov

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

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

Email: zenka.2012@mail.ru

ORCID: 0009-0005-0708-7692

Шатилов Юрий Сергеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций, отдел исследований средств и технологий ликвидации чрезвычайных ситуаций, начальник отдела

Адрес: ул. Солтыса, 183а, 220046, г. Минск, Беларусь

Email: ushatilov@mail.ru

SPIN-код: 7421-7902

Yuri S. Shatilov

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Research Institute of Fire Safety and Emergency Problems, Department of Research of Means and Technologies for Emergency Elimination, Head of the Department

Address: Soltysa str., 183a, 220046, Minsk, Belarus

Email: ushatilov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8687-9989

Аниськов Виктор Игоревич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», научно-
исследовательский институт пожарной
безопасности и проблем чрезвычайных
ситуаций, отдел исследований средств
и технологий ликвидации чрезвычайных
ситуаций, старший научный сотрудник

Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь
Email: aniskov.viktor@gmail.com
SPIN-код: 4538-2916

Viktor I. Anis'kov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Research Institute of Fire Safety and Emergency
Problems, Department of Research of Means
and Technologies for Emergency Elimination,
Senior Researcher

Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus
Email: aniskov.viktor@gmail.com
ORCID: 0009-0005-4896-0064

INFLUENCE OF VARIOUS OPERATING CONDITIONS OF A COMPRESSED AIR BREATHING APPARATUS ON THE STABILITY OF THE LUNG DEMAND VALVE

Lakhvich V.V., Morozov A.A., Kozlov E.A., Shatilov Yu.S., Anis'kov V.A.

Purpose. To experimentally evaluate the influence of various operating conditions of a compressed air breathing apparatus on the stability of the operation of the lung demand valve of a compressed air breathing apparatus.

Methods. Empirical research methods included experimentation and measurement. Theoretical methods included analysis and synthesis of literary sources, as well as statistical processing and generalization of the obtained experimental data.

Findings. Based on operational tests, it was established that a decrease in ambient temperature (down to -3 °C) in conditions of high humidity and simulated exposure to water aerosol (while fire extinguishing) leads to increased inhalation effort. As work intensity increases, breathing becomes more difficult due to the increased amount of air to be consumed, and in some cases, impossible. The primary cause of failure is icing of the inhalation valve seat and plate, leading to their mechanical sticking and complete blockage of air supply to the sub-mask space, as well as to disruption of the continuity of air supply to the sub-mask space.

Application field of research. The research results can be used by the Ministry of Emergency Situations in developing recommendations for the safe use of breathing apparatus in low-temperature conditions: monitoring and preventing icing, and actions at the first signs of increased breathing disruption.

Keywords: compressed air breathing apparatus, lung demand valve, icing, low temperatures, reliability, fire safety.

(The date of submitting: January 9, 2026)

REFERENCES

1. Kulakovskiy B.L. [et al.]. *Pozharnaya avariyno-spasatel'naya tekhnika i svyaz'* [Fire and emergency rescue equipment and communication]: textbook: in 2 parts. Minsk: Republican Center for Certification and Expertise of the Ministry of Emergency Situations, 2012. Part 1. 421 p. (rus)
2. Dolgikh E.S., Sarayev I.V., Bubnov A.G. Voprosy primeneniya sredstv individual'noy zashchity organov dykhaniya i zreniya v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur [Questions of the use of personal protective equipment for respiratory organs and vision in conditions of negative temperatures]. *Proc. of XVII Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 90th anniversary of civil defense «Fire and Emergency Safety»*, Ivanovo, November 24, 2022. Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2022. Pp. 354–361. (rus). EDN: VXL MJQ.
3. Stoyanov N.I., Smirnov S.S., Smirnova A.V. *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki (tekhnicheskaya termodinamika i teplomassoobmen)* [Theoretical foundations of heat engineering (technical thermodynamics and heat and mass transfer)]: tutorial. Stavropol: North Caucasus Federal University, 2014. 226 p. (rus). EDN: ZGJQUD.
4. Kopachev V.F. *Termodinamika, teploperedacha i gidravlika* [Thermodynamics, heat transfer and hydraulics]: textbook; 2nd ed. Saratov, Moscow: Profobrazovanie, Ay Pi Ar Media, 2021. 250 p. (rus). EDN: SITNGC.
5. Kirillov V.F., Filin A.S., Chirkin A.V. Obzor rezul'tatov proizvodstvennykh ispytaniy sredstv individual'noy zashchity organov dykhaniya (SIZOD) [Overview of industrial testing outcome of respiratory organs personal protection equipment]. *Toxicological Review*, 2014. No. 6 (129). Pp. 44–49. (rus). EDN: ZCOSBT.
6. Dolgikh E.S., Bubnov A.G. Sravnitel'naya otsenka otechestvennykh marok SIZOD po statisticheskim pokazatelyam raboty funktsional'nykh elementov v protsesse ekspluatatsii [Comparative assessment of domestic brands of PPE according to statistical indicators of the functional elements in the process of operation]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2025. No. 3 (291). Pp. 15–20. (rus). EDN: ZWHQAF.
7. Loginov V.I., Maslov Yu.N., Kislyakov R.A., Karpova I.A. Trebovaniya i metody ispytaniy sredstv individual'noy zashchity organov dykhaniya i zreniya pozharnykh v rossiyskikh i evropeyskikh standartakh [Requirements and test methods for firefighter personal respiratory and ocular protection equipment in Russian and European standards]. *Occupational Safety in Industry*, 2024. No. 6. Pp. 56–62. (rus). EDN: BEMFGF.

8. Belizov M.D., Malykhin A.V. *Podgotovka gazodymozashchitnika* [Training of a gas – smoke rescuer]: tutorial. Irkutsk: East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russia, 2011. 108 p. (rus). EDN: WHSODZ.
9. Aganov S.S., Bolotin A.E., Lobzha M.T., Terebnev V.V., Ivanova E.S., Makhonin E.V., Davidenko D.N., Presnov A.I. *Fizicheskaya i professional'naya podgotovka obuchayushchikhsya v sisteme MChS Rossii*: [Physical and professional training of students in the system of EMERCOM of Russia]: tutorial: in 2 volumes. Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia, 2019. Vol. 1. 480 p. (rus). EDN: OFVVGI.

Copyright © 2026 Lakhvich V.V., Morozov A.A.,
Kozlov E.A., Shatilov Yu.S., Anis'kov V.A.

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРАТНОСТИ ОГNETУШАЩЕЙ ПЕНЫ, ПОЛУЧАЕМОЙ В УСТРОЙСТВАХ С СЕТКАМИ

Камлюк А.Н., Лихоманов А.О., Гараев Ю.В., Вашкевич Д.А.

Цель. На основе результатов экспериментальных исследований разработать математическую модель для прогнозирования кратности пены с учетом основных параметров процесса пенообразования на сетках пеногенерирующих устройств.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических (анализ, синтез, сравнение) и экспериментальных методов исследования. Кратность пены определялась экспериментальным путем по разработанной методике. Обработка экспериментальных данных и создание математической модели включали использование статистического регрессионного анализа.

Результаты. В результате исследований получены экспериментальные данные зависимости кратности пены от ряда параметров процесса пенообразования на сетках пеногенерирующих устройств (размера ячейки сетки, расстояния от выходного отверстия насадка до сетки, диаметра выходного отверстия насадка, скорости подачи пенообразующего раствора и его свойств). В частности, для учета размера ячейки сетки использован обобщенный параметр K_m , отражающий долю заполненной проволокой части от всей площади поверхности сетки. Скорость пенообразующего раствора и его свойства учтены с помощью числа капиллярности Ca . На основе анализа и обобщения полученных данных разработана математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, отражающая перечисленные параметры пенообразования на сетках. Прогнозные значения по разработанной модели хорошо согласуются с экспериментальными значениями (анализ остатков подтвердил адекватность модели). Средняя погрешность расчета кратности пены составляет менее 10 %.

Область применения исследований. Проектирование и эксплуатация пеногенерирующих устройств с сетками. Предложенная модель позволяет подбирать необходимую конфигурацию параметров пеногенерирующего устройства с учетом применяемого пенообразователя и условий подачи пенообразующего раствора для получения наиболее эффективной с точки зрения пожаротушения пены.

Ключевые слова: пеногенерирующее устройство, сетка, кратность пены, математическая модель.

(Поступила в редакцию 12 января 2026 г.)

Введение

Для ликвидации пожаров твердых и жидких веществ, не вступающих во взаимодействие с водой при тушении, применяется воздушно-механическая пена низкой кратности от 3 до 20 (определяется как отношение объема пены к объему раствора пенообразователя, из которого она получена) [1]. При этом чем выше кратность пены (имеется в виду внутри диапазона от 3 до 20), тем больше ее огнетушащая эффективность [1–4]. На практике пену низкой кратности (далее – пена) получают с помощью оросителей для автоматических установок пожаротушения, на сетках в насадках для пожарных стволов и в установках генерирования компрессионной пены. В последнем случае для получения пены имеется возможность регулирования подачи воды и пенообразователя (а значит, и процентного состава пенообразующего раствора), а также подачи воздуха. Все перечисленные процессы контролируются в режиме реального времени (в момент пожаротушения) с помощью системы управления установки генерирования компрессионной пены, а значит, контролю подлежит и численное значение кратности получаемой пены. В то же время на оросителях и сетках в насадках пожарных стволов нет возможности регулировать подачу жидкой фазы и воздуха. В связи с этим можно разделить установки и устройства для получения пены по возможности регулирования ее кратности на две категории (рис. 1).

В случае когда есть возможность регулирования кратности пены, добиваться высокой огнетушащей эффективности можно, например, за счет регулирования расхода воздуха прямо на месте ликвидации чрезвычайной ситуации. В другом случае (нерегулируемая кратность пены) важно заблаговременно позаботиться о результатах тушения пожара за счет рационального подбора параметров устройств и средств, применяемых для тушения. Здесь на

первое место необходимо поставить прогноз численного значения кратности пены, т.е. математическую модель, по которой можно оценить кратность пены с учетом геометрических особенностей устройства пожаротушения, гидродинамических параметров подачи раствора пенообразователя, включая физико-механические свойства последнего.



Рисунок 1. – Классификация установок и устройств для получения пены в зависимости от возможности регулирования ее кратности

Так, с целью прогнозирования значения кратности пены, генерируемой оросителями для автоматических установок пожаротушения, в работе [5] исследована зависимость данной характеристики от геометрических параметров розеточного оросителя, а также параметров, влияющих на процесс образования пены (скорости подачи и свойств раствора пенообразователя). В исследовании использовались оросители с розетками внешнего диаметра от 20 до 400 мм. В итоге предложена математическая модель для прогнозирования кратности пены:

$$K = 0,026\gamma_{e,r}K_s^{0,5}\left(\frac{L_f}{D}\right)^g\left(\frac{D}{D_{max}}\right)^{-0,05}We^{0,32}, \quad g = \begin{cases} 0,1 & \text{при } L_f / D \leq 3,0; \\ -0,03 & \text{при } 3,0 < L_f / D \leq 7,5, \end{cases} \quad (1)$$

где $\gamma_{e,r}$ – коэффициент для учета свойств пенообразователя;

K_s – коэффициент рабочей поверхности розетки;

L_f – длина дужек;

D – внешний диаметр розетки;

D_{max} – наибольший диаметр розетки;

We – число Вебера.

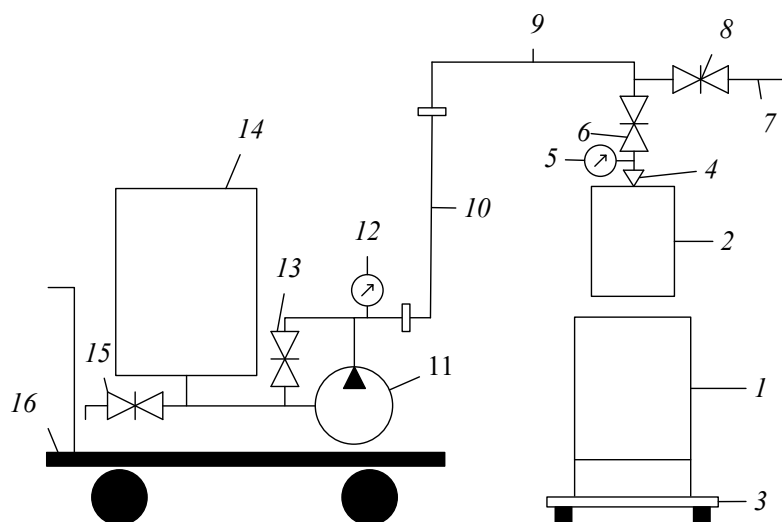
Данная модель построена на основе результатов анализа большого массива экспериментальных данных, а значения степеней при безразмерных членах уравнения определены с помощью метода логарифмирования. Таким образом, она учитывает не только соотношение геометрических параметров элементов оросителя, но и гидродинамику процесса генерирования пены, а также свойства применяемого пенообразующего раствора.

В данной работе описаны результаты исследований, основной целью которых являлось построение аналогичной математической модели для прогнозирования кратности пены, получаемой при использовании пеногенерирующих устройств с сетками, например, пожарных стволов с пенными насадками.

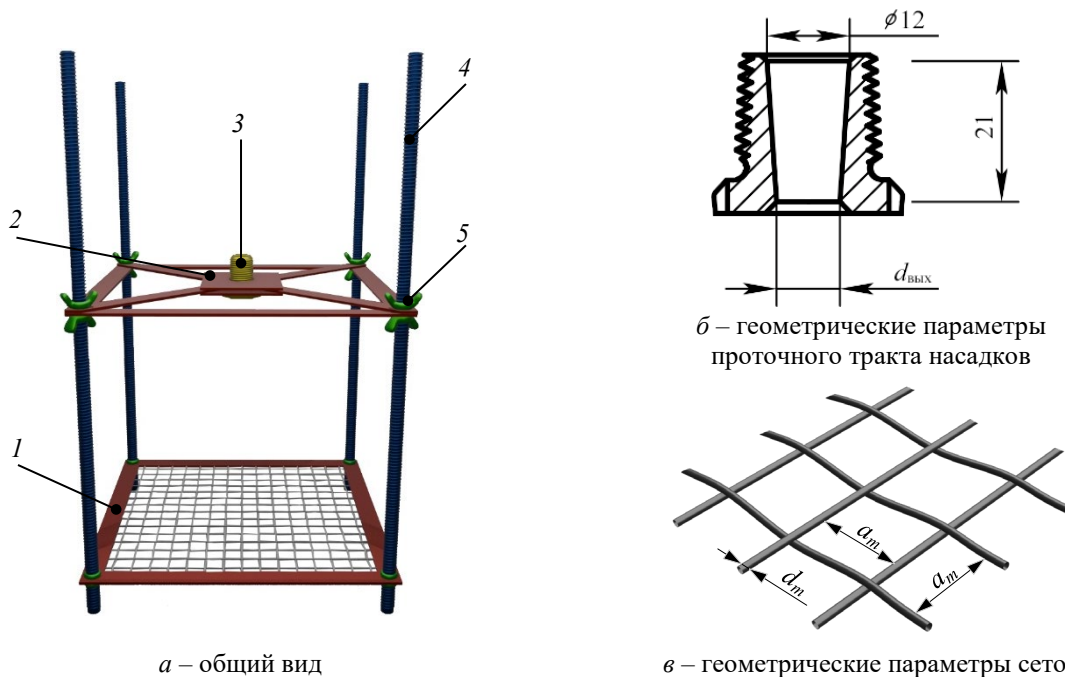
Основная часть

Экспериментальное определение кратности пены. Экспериментальное определение зависимости кратности пены от геометрических параметров сетки, гидродинамических параметров и свойств пенообразующего раствора выполнялось на установке, схема которой представлена на рисунке 2.

Устройство для образования пены на сетке (рис. 2) состоит из четырех металлических вертикальных ребер с резьбой, на которых расположены фиксаторы, позволяющие регулировать расстояние от выходного отверстия насадка для подачи пенообразующего состава до сетки (рис. 3а). В нижней части устройства крепится сетка, а в верхней части находится держатель для крепления устройства на трубопроводе экспериментальной установки, благодаря которому оно может быть оперативно смонтировано либо демонтировано.



1 – мерная емкость; 2 – устройство для образования пены на сетке; 3 – весы; 4 – насадок; 5, 12 – манометр; 6, 8, 13, 15 – запорный вентиль; 7, 9 – трубопровод; 10 – напорный рукав; 11 – насос; 14 – емкость с рабочим раствором пенообразователя; 16 – каркас установки
Рисунок 2. – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процесса образования пены на сетках пеногенерирующих устройств



1 – рамка с сеткой; 2 – рамка с держателем; 3 – насадок; 4 – металлические вертикальные ребра с резьбой; 5 – фиксатор; $d_{\text{вых}}$ – диаметр входного и выходного отверстий насадка; a – длина стороны ячейки сетки в свету, d_m – диаметр проволоки сетки
Рисунок 3. – Устройство к экспериментальной установке для исследования процесса образования пены на сетках пеногенерирующих устройств

При проведении эксперимента для генерирования пены применялись все возможные комбинации следующих параметров: размер ячеек сетки 0,5×0,5; 0,7×0,7; 1,0×1,0; 2,0×2,0 и 3,2×3,2 мм; диаметр выходного отверстия насадка для подачи пенообразующего раствора: 4, 6, 8 и 11 мм (форма проточного тракта насадков представлена на рисунке 3б); расстояние от выходного отверстия насадка до сетки 50, 100, 200, 300 и 400 мм. В качестве пенообразователей для приготовления раствора использовались пенообразователи целевого и общего назначения по СТБ 2459¹ марок ПО-РЗФ (6 %) и ПО-6РТС (6 %) соответственно. Следует

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. – Мн.: Госстандарт, 2016. – III, 42 с.

подчеркнуть, что в исследованиях для получения пены приготавливался именно рабочий раствор пенообразователя, т.е. водный раствор с рекомендуемой производителем концентрацией пенообразователя в нем (указана в скобках в названии марки пенообразователя). Как правило, при отклонении концентрации пенообразователя от рекомендуемой производителем наблюдается существенное ухудшение пенообразования, в том числе кратности пены. По этой причине растворы пенообразователей с иной концентрацией активного компонента не рассматривались в данной работе. Методика определения кратности пены заключалась в следующем. При использовании экспериментальной установки (рис. 2) рабочий раствор пенообразователя подавался из емкости 14 с помощью насоса 11 по напорному рукаву 10 и трубопроводу 9 к запорным вентилям 6 и 8, которые находились в закрытом положении. Далее с целью настройки равномерной работы установки и создания необходимого рабочего давления открывался запорный вентиль 8 и раствор подавался через трубопровод 7 в дренаж не менее 20 с. Одновременно с помощью вентиля 13 по показаниям манометра 12 устанавливалось давление 2,8 атм. После настройки установки вентиль 8 закрывался, а вентиль 6 открывался, тем самым раствор пенообразователя подавался через насадок 4 к устройству 2, с помощью которого пена генерировалась и попадала в мерную емкость 1. Опыт прекращался при заполнении мерной емкости. Затем кратность пены определялась по формуле:

$$K = \frac{V_e \cdot \rho_{p-ра}}{m_2 - m_1}, \quad (3)$$

где V_e – объем мерной емкости, м³;

m_1 и m_2 – масса мерной емкости, пустой и заполненной пеной, кг;

$\rho_{p-ра}$ – плотность раствора пенообразователя, кг/м³.

Эксперимент проводился сериями по пять опытов. Все измерения осуществлялись с помощью поверенного в установленном порядке оборудования.

Для анализа и обобщения полученных экспериментальных данных, а также дальнейшей разработки математической модели в безразмерном виде ряд исследуемых параметров были модифицированы. В частности, для учета различного размера ячейки сетки (рис. 3в) введен новый безразмерный параметр – коэффициент рабочей поверхности сетки K_m , определяемый по следующей формуле:

$$K_m = a_m^2 / (a_m + d_m)^2, \quad (4)$$

где a_m – длина стороны ячейки сетки в свету, мм;

d_m – диаметр проволоки сетки, мм.

Здесь следует пояснить, что согласно ГОСТ 2715² стандартные сетки имеют различие не только по размеру ячейки, но и по диаметру применяемого прутка проволоки. По этой причине по аналогии с исследованием процесса образования пены в розеточных оросителях для автоматических установок пожаротушения [1] принято решение ввести параметр, который показывает долю заполненной проволокой части от всей площади поверхности сетки. Связано это с тем, что при изменении данного коэффициента в большую либо меньшую сторону соответственно меняется и количество пенообразующего раствора, которое ударяется о сетку в процессе его подачи через насадок, что, в свою очередь, может существенно влиять на кратность получаемой пены. Параметры использованных при эксперименте сеток приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры сеток для экспериментальных исследований

Длина стороны ячейки a_m , мм	Диаметр проволоки d_m , мм	Коэффициент рабочей поверхности сетки K_m
0,5	0,20	0,51
0,7	0,28	0,51
1,0	0,25	0,64
2,0	0,40	0,69
3,2	0,50	0,75

Для учета изменения скорости потока пенообразующего раствора на выходе из насадка, а также свойств применяемого пенообразователя в модели принято использовать

² Сетки металлические проволочные. Типы, основные параметры и размеры: ГОСТ 2715-75. – Взамен ГОСТ 2715-44; введ. 01.01.1977. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 15 с.

гидродинамический критерий подобия – число капиллярности Ca [6; 7], определяемое по формуле:

$$Ca = \eta v / \sigma, \quad (5)$$

где η – динамический коэффициент вязкости жидкости;
 v – средняя скорость потока жидкости;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Средняя скорость потока жидкости на выходе из насадка определялась исходя из расхода раствора пенообразователя через насадок при давлении на насосе 2,8 атм (выбор давления связан с техническими ограничениями насосной установки). Для этого емкость 14 (рис. 2) заполнялась рабочим раствором пенообразователя. На емкости предварительно были проставлены верхняя и нижняя метки объема жидкости 30 л таким образом, чтобы верхняя граница была ниже уровня жидкости при заполненной емкости, а нижняя – выше дна емкости. Производился пуск установки и подача раствора пенообразователя через насадок 4 в мерную емкость 1 (без установки устройства для образования пены на сетке). В процессе с помощью секундомера определялось время прохождения уровня жидкости в емкости 14 от верхней метки до нижней, а также фиксировалось давление перед насадком по манометру 5. Далее скорость потока жидкости из выходного отверстия насадка определялась по формуле:

$$v = \frac{4V_{\text{уч}}}{\pi d_{\text{вых}}^2 t}, \quad (6)$$

где $V_{\text{уч}}$ – объем жидкости между верхней и нижней метками в емкости 14 (рис. 2);
 t – время прохождения уровня жидкости от верхней метки до нижней в емкости 14.

Экспериментальные значения расхода, средней скорости и давления потока жидкости перед насадком представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Экспериментальные значения расхода, средней скорости и давления потока жидкости перед насадком

Диаметр выходного отверстия насадка $d_{\text{вых}}$, мм	Расход, $(\text{м}^3/\text{с}) \cdot 10^{-4}$	Средняя скорость v , м/с	Давление перед насадком, атм
4	2,65	21,1	2,5
6	5,32	18,8	2,3
8	8,49	16,9	2,0
11	14,16	14,9	1,2

Влияние на кратность пены расстояния от выходного отверстия насадка до сетки принято учитывать с помощью безразмерного члена уравнения (L/L_{max}) , отражающего отношение фактической длины пути струи пенообразующего раствора до соударения с сеткой к максимальной, которая принята равной 400 мм в рамках текущих исследований.

Результаты проведенного эксперимента по определению кратности пены с использованием сеток пеногенерирующих устройств представлены на рисунке 4. Для удобства визуального анализа результаты представлены в виде 3D-поверхности, построенной по полученным экспериментальным значениям кратности при различных комбинациях значений числа капиллярности Ca , относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки (L/L_{max}) и коэффициента рабочей поверхности розетки K_m .

Здесь видно, что при значениях K_m от 0,51 до 0,64 график зависимости кратности пены от числа капиллярности и относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки имеет схожий вид, при этом наибольшие значения кратности от 18 до 23 находятся в области значений Ca от 0,70 до 0,85 и (L/L_{max}) от 0,7 до 1,0 соответственно. Вместе с тем пиковое значение кратности пены наблюдается при максимальных значениях вышеуказанных параметров – $Ca = 0,85$ и $(L/L_{\text{max}}) = 1$. Однако при $K_m = 0,51$ наибольшее значение кратности пены 22,69, в то время как при $K_m = 0,64$ оно уже на 13 % ниже и составляет 19,82. В то же время следует отметить, что при $K_m = 0,64$ область 3D-поверхности в диапазоне значений Ca от 0,5 до 0,6 и (L/L_{max}) от 0,25 до 1,00 находится выше по сравнению с графиком при $K_m = 0,51$. Таким образом, при увеличении коэффициента рабочей поверхности сетки 3D-поверхность становится более плоской, с меньшим размахом R (разница между наибольшим и наименьшим значением кратности пены), а именно: $R = 11,48$ при $K_m = 0,51$ и $R = 7,64$ при $K_m = 0,64$.

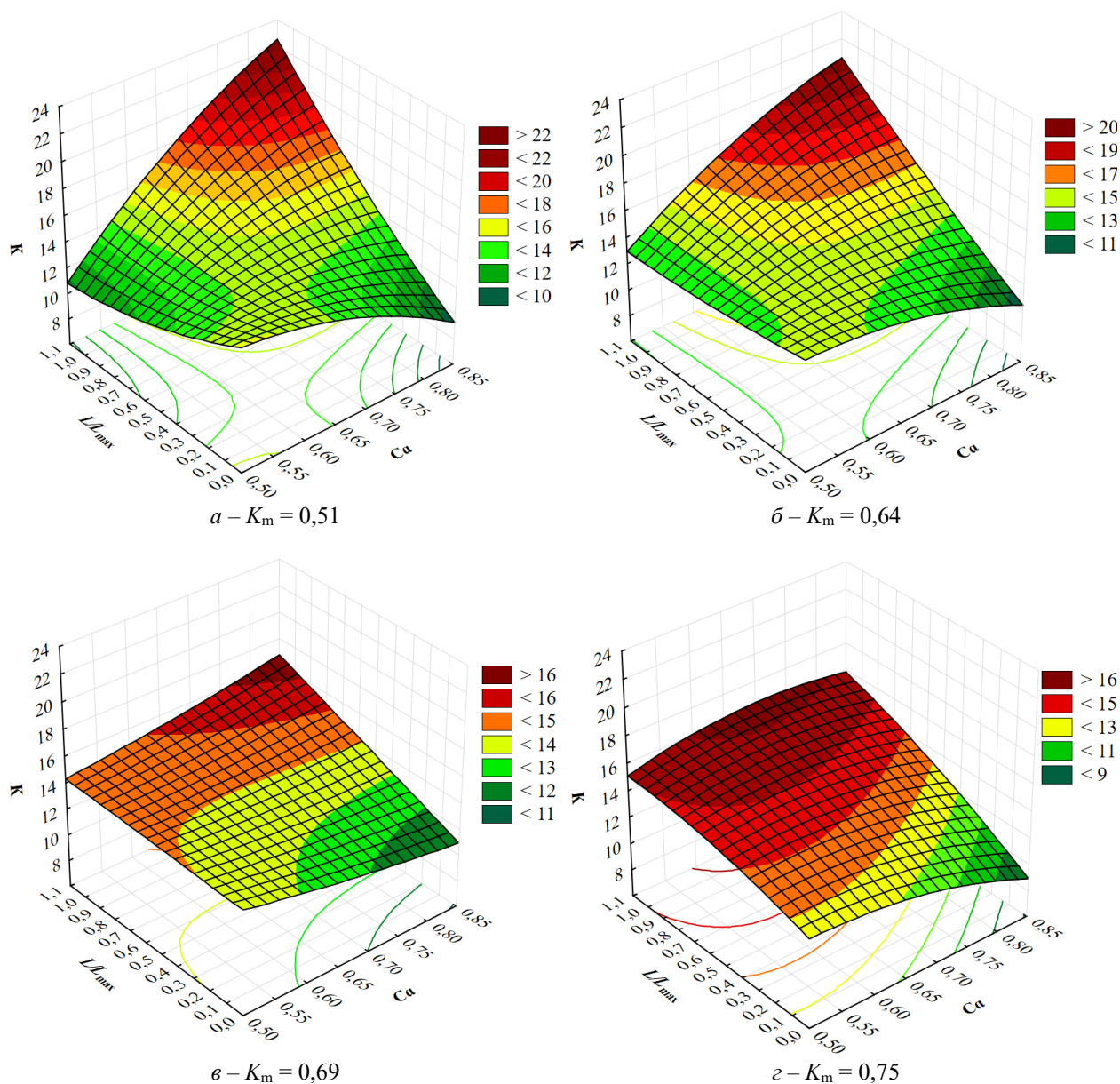


Рисунок 4. – Зависимость кратности пены от числа капиллярности Ca и относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки (L / L_{max}) при различных значениях коэффициента рабочей поверхности сетки K_m

При дальнейшем увеличении коэффициента K_m от 0,64 до 0,75, как видно на рисунках 4в и 4г, происходит явное смещение области наибольших значений кратности пены в диапазон более низких значений числа капиллярности Ca и (L/L_{max}). При этом максимальные значения кратности пены постепенно снижаются по сравнению с ранее рассмотренным диапазоном K_m от 0,51 до 0,64. Так, при $K_m = 0,69$ наибольшая кратность пены 16,7, а при $K_m = 0,75$ – 16,2. Кроме того, здесь также наблюдается уменьшение размаха значений кратности пены с ростом коэффициента рабочей поверхности сетки (R составляет 6,23 и 5,69 при K_m равном 0,69 и 0,75 соответственно), т.е. с увеличением K_m влияние числа капиллярности Ca и относительного расстояния (L/L_{max}) на изменение кратности пены становится менее существенным.

С целью возможности прогнозирования значения кратности пены в зависимости от конфигурации параметров процесса получения пены на сетках пеногенерирующих устройств необходимо построение математической модели на основе полученных экспериментальных данных с последующей проверкой ее точности и адекватности.

Разработка математической модели. Принимая во внимание ранее обозначенные основные исследуемые параметры процесса образования пены на сетках, обобщенный вид

математической модели для прогнозирования кратности огнетушащей пены по аналогии с моделью (1) [5] может быть представлен следующим образом:

$$K = Ca^a K_m^b (L/L_{\max})^c, \quad (7)$$

где a, b, c – значения степеней при безразмерных членах уравнения.

Поиск значений степеней a, b и c в уравнении (7) выполнялся с помощью метода логарифмирования и сопоставления с полученными экспериментальными зависимостями кратности пены от включенных в данное уравнение переменных величин. Значения степеней приняты равными угловым коэффициентам прямых линий регрессии для соответствующих зависимостей в логарифмическом масштабе. Для зависимостей $\ln(K) = f(Ca)$, $\ln(K) = f(K_m)$ и $\ln(K) = f(L/L_{\max})$ построены прямые линии регрессии с использованием метода наименьших квадратов (рис. 5) и установлены их угловые коэффициенты: $a = 0,12$; $b = -0,11$ и $c = 0,09$ соответственно.

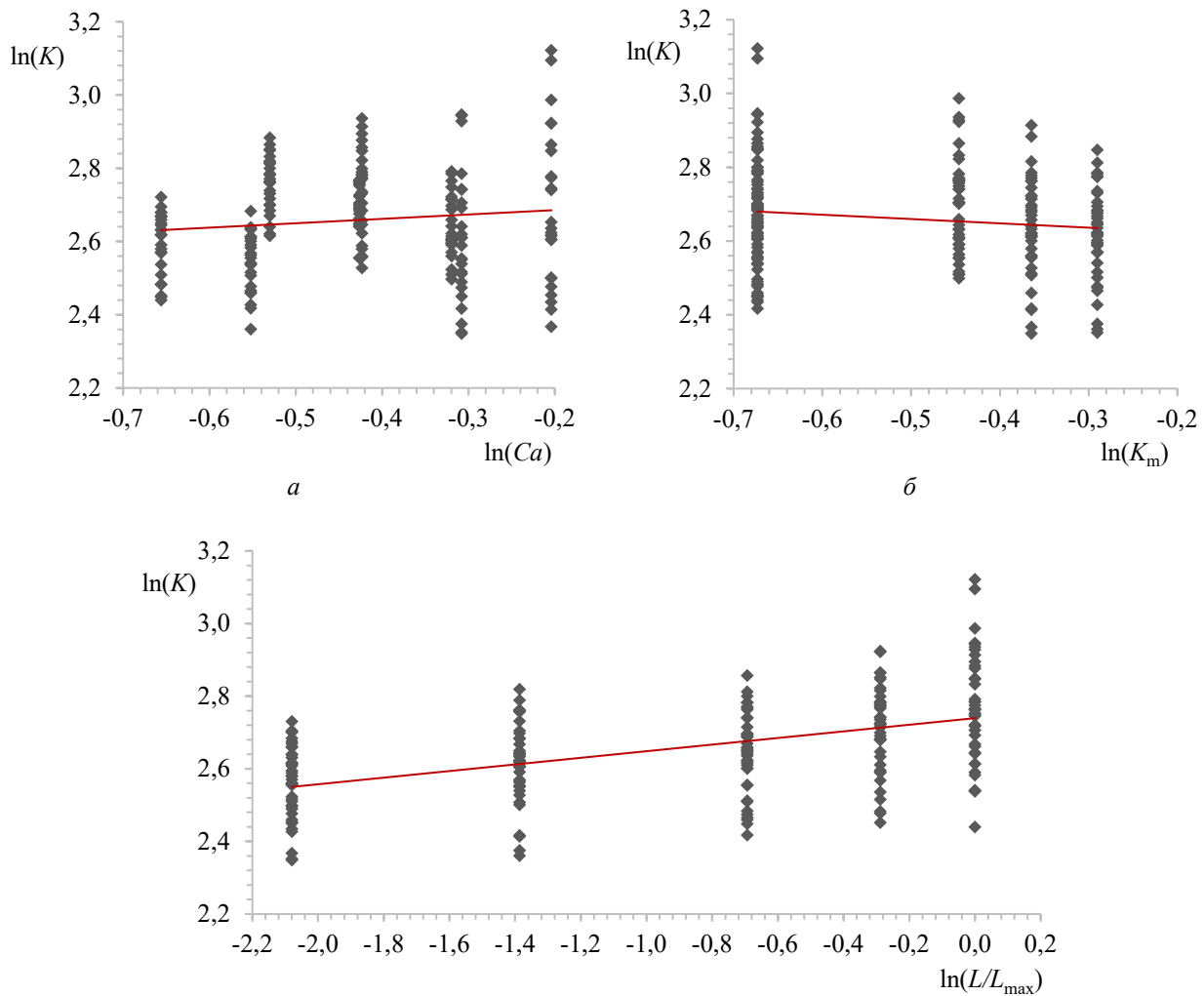


Рисунок 5. – Зависимость логарифма кратности пены K от логарифма числа капиллярности Ca (а), логарифма коэффициента рабочей поверхности сетки K_m (б) и логарифма относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки L/L_{\max} (в)

Область адекватности модели ограничивается следующими диапазонами значений входящих в нее переменных величин: $Ca = 0,519-0,815$; $K_m = 0,51-0,75$, $L = 50-400$ мм.

Для подтверждения адекватности разработанной модели проведен анализ остатков (разность между экспериментальными значениями зависимой переменной и их прогнозными значениями по модели). Остатки – случайные величины и не должны зависеть от прогнозных по моделям значений зависимой переменной. Из представленных на рисунке 6 данных

видно, что систематической зависимости значений остатков от прогнозных значений зависимой переменной не наблюдается (коэффициент корреляции $r = 0,07$), следовательно, по данному критерию модель (8) можно считать адекватной.

Еще одним критерием адекватности моделей является нормальность распределения величин остатков. С целью оценки нормальности их распределения проведена процедура вычисления значения критерия согласия и проверки гипотезы о соответствии распределения остатков нормальному закону. Для этого было использовано программное обеспечение STATISTICA, а именно модуль «Подгонка распределения» [8]. С помощью данного модуля построена гистограмма распределения остатков, которая представлена на рисунке 7. Здесь указаны значения критерия согласия χ^2 и уровня значимости критерия p . В данном случае нулевая гипотеза означает, что распределение остатков соответствует нормальному закону. Так как значения уровня значимости критерия p значительно больше 0,05, вероятность ошибиться, отбросив нулевую гипотезу, велика, поэтому принята гипотеза о нормальности рассматриваемого распределения остатков.

Таким образом, результаты проведенного анализа остатков подтверждают адекватность построенной модели для прогнозирования значений зависимой переменной (кратности пены).

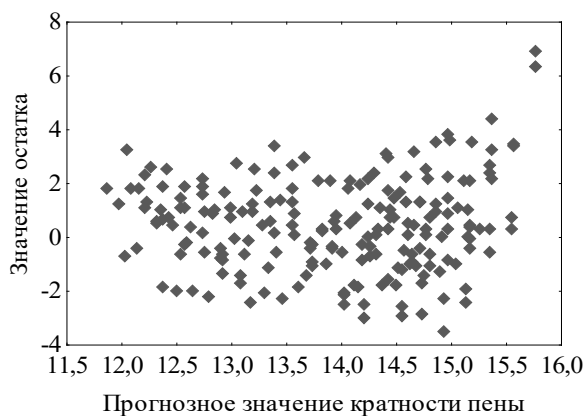


Рисунок 7. – График рассеяния остатков в зависимости от прогнозных значений зависимой переменной

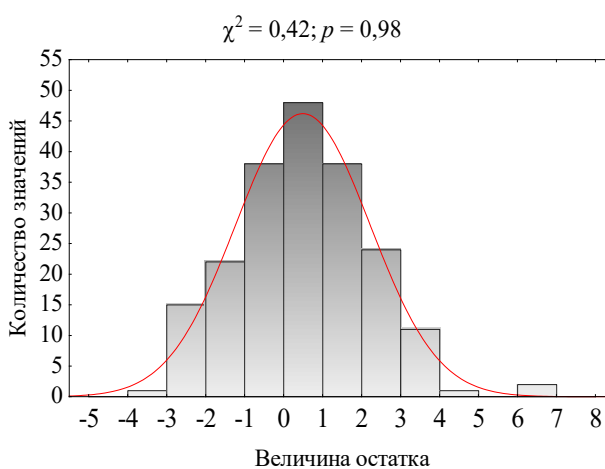


Рисунок 8. – Гистограмма распределения остатков

Заключение

В результате проведенных исследований получены экспериментальные данные о зависимости кратности пены от ряда параметров процесса пенообразования на сетках пеногенирующих устройств, например, пожарных стволов с пенными насадками. На основе анализа и обобщения полученных результатов разработана математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, учитывающая основные регулируемые параметры (размер ячейки сетки, расстояние от выходного отверстия насадка до сетки, диаметр выходного отверстия насадка), а также гидродинамику процесса подачи пенообразующего раствора и его свойства. В частности, для учета размера ячейки сетки использован обобщенный параметр K_m , который показывает долю заполненной проволокой части от всей площади поверхности сетки. Скорость пенообразующего раствора и его свойства в модели учитываются с помощью числа капиллярности Ca . Прогнозные значения по разработанной модели хорошо согласуются с экспериментально измеренными значениями. Средняя погрешность расчета кратности пены составляет менее 10 %.

Предложенная модель позволит подбирать необходимую конфигурацию параметров пеногенирующего устройства с учетом применяемого пенообразователя и условий подачи пенообразующего раствора для получения наиболее эффективной с точки зрения пожаротушения пены.

В рамках дальнейших исследований планируется валидация и при необходимости уточнение разработанной модели с использованием других марок пенообразователей различного назначения, а также расширение ее граничных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2023. – 244 с. – ISBN: 978-985-590-186-1.
2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2019. – 224 с. – ISBN: 978-985-590-050-5.
3. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с возможностью изменения расхода огнетушащего средства: от моделирования до огневых испытаний: монография / А.Н. Камлюк, А.А. Морозов, В.В. Пармон. – Мн.: УГЗ, 2024. – 189 с. – ISBN: 978-985-590-220-2.
4. Корольченко, Д.А. Тушение пламени гидрофобных материалов водными растворами смачивателей / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 3. – С. 61–68. – EDN: TUBQAX.
5. Kamluk, A.N. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov, E.G. Govor, A.V. Grachulin // Magazine of Civil Engineering. – 2025. – Vol. 17, No. 07. – Article 13102. – 11 p. – DOI: 10.34910/MCE.131.2.
6. Камлюк, А.Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. – EDN: SQVQWY.
7. Камлюк, А.Н. Количественное описание механизмов образования воздушно-механической пены низкой кратности для нужд пожаротушения / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 276–288. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. – EDN: EJOWFD.
8. Яновский, Т.А. Многомерный регрессионный анализ и его приложения на основе пакета STATISTICA: учеб. пособие / Т.А. Яновский, А.Г. Яновский. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 64 с. – EDN: VHVBJF.

Математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, получаемой в устройствах с сетками

Mathematical model for predicting the expansion rate of fire extinguishing foam produced in devices with meshes

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», ученый секретарь

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

Email: kan@ucp.by

SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Scientific Secretary

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

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

Гараев Юрий Владимирович

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

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

Email: y.garaev@icloud.com

SPIN-код: 8162-6836

Yuriy V. Garaev

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

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

Email: y.garaev@icloud.com

ORCID: 0000-0002-4980-2712

Вашкевич Дмитрий Андреевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», оперативно-
аналитический отдел, старший инспектор

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

Email: gogodimago@gmail.com

Dmitriy A. Vashkevich

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Operational and Analytical Department,
Senior Inspector

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

Email: gogodimago@gmail.com

ORCID: 0009-0001-3403-4474

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE EXPANSION RATE OF FIRE EXTINGUISHING FOAM PRODUCED IN DEVICES WITH MESHES

Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V., Vashkevich D.A.

Purpose. Based on the results of experimental studies, a mathematical model is developed for predicting the foam multiplicity, taking into account the main parameters of the foam formation process on the grids of foam-generating devices.

Methods. The general methodology of the work included the theoretical (analysis, synthesis, comparison) and experimental research methods. The foam expansion rate was determined experimentally using the developed method. Processing of experimental data and creation of a mathematical model included the use of statistical regression analysis.

Findings. As a result of the research, experimental data were obtained on the dependence of the foam multiplicity on a number of parameters of the foaming process on the mesh of foam-generating devices (mesh cell size, distance from nozzle outlet to mesh, nozzle outlet diameter, foaming solution flow velocity and its properties). In particular, to take into account the size of the mesh cell, a generalized parameter K_m was used, reflecting the proportion of the part filled with wire from the entire surface area of the mesh. The flow velocity of the foaming solution and its properties are taken into account using the capillarity number Ca . Based on the analysis and generalization of the obtained data, the mathematical model was developed for predicting the expansion rate of fire-extinguishing foam, reflecting the listed parameters of foam formation on the meshes. The predicted values according to the developed model coincide with the experimental values (analysis of residuals confirmed the adequacy of the model). The average error in calculating the foam expansion ratio is less than 10 %.

Application field of research. Design and operation of foam-generating devices with meshes. The proposed model allows for the selection of the required foam-generating device configuration taking into account the foam concentrate used and the foam solution flow conditions to produce the most effective fire extinguishing foam.

Keywords: foam-generating device, mesh, foam expansion rate, mathematical model.

(The date of submitting: January 12, 2026)

REFERENCES

1. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. *Pennye orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing installations]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus). ISBN: 978-985-590-186-1.
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus). ISBN: 978-985-590-050-5.
3. Kamlyuk A.N., Morozov A.A., Parmon V.V. *Stvol pozharный ruchnoy universal'nyy kombinirovannyi s vozmozhnost'yu izmeneniya raskhoda ognitushashchego sredstva: ot modelirovaniya do ognivykh ispytaniy* [A universal combined hand-held fire nozzle with the ability to change the flow rate of fire extinguishing agent: from modeling to fire testing]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2024. 189 p. (rus). ISBN: 978-985-590-220-2.
4. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F. Tushenie plameni gidrofobnykh materialov vodnymi rastvorami smachivateley [Extinguishing flames of hydrophobic materials by water solutions of wetting agent]. *Fire and Explosion Safety*, 2015. Vol. 24, No. 3. Pp. 61–68. (rus). EDN: TUBQAX.
5. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G., Grachulin A.V. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers. *Magazine of Civil Engineering*, 2024. Vol. 17, No. 7. Article 13102. 11 p. DOI: 10.34910/MCE.131.2.
6. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G. *Zavisimost' ob'emnoy ustoychivosti nizkokratnykh pen ot ikh kratnosti* [Dependence of the volume stability of low-expansion foam on the expansion rate]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024. Vol. 69, No. 4. Pp. 194–205. (rus). DOI:10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. EDN: SQVQWY.
7. Kamlyuk A.N. *Kolichestvennoe opisanie mekhanizmov obrazovaniya vozdušno-mekhanicheskoy peny nizkoy kratnosti dlya nuzhd pozharotusheniya* [Quantitative description of the mechanisms of formation of low multiplicity air-mechanical foam for firefighting needs]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 276–288. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. EDN: EJOWFD.

8. Yanovskiy T.A., Yanovskiy A.G. *Mnogomernyy regressionnyy analiz i ego prilozheniya na osnove paketa STATISTICA* [Multivariate regression analysis and its applications based on the STATISTICA package]: textbook. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2015. 64 p. EDN: VHVBJF.

Copyright © 2026 Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V., Vashkevich D.A.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА КОМПЛЕКСНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛИАМИДА-6

Рева О.В., Криваль Д.В., Дечко М.М., Дьячкова Л.Н.

Цель. Построение адекватной математической модели состава комплексного замедлителя горения для полиамида-6 с заданной целевой функцией и применение ее для моделирования оптимальных характеристик состава замедлителя горения (обеспечивающего огнестойкость полученного композиционного материала категории ПВ-0 и снижение основных физико-механических характеристик не более чем на 8–10 % по сравнению с исходным полиамидом).

Методы. Использованы теоретические методы статистического анализа результатов эксперимента для получения регрессионной модели с проверкой ее статистической значимости и адекватности; метод сечений дискриминантной функции в плоскости наиболее важных факторов, выявленных регрессионным анализом. Для расчетов применены программы Statistica (TIBCO Software Inc.) и PTC Mathcad Prime (PTC Inc.).

Результаты. Проведено экспериментальное исследование и статистический анализ полученных данных, на основе которого методами регрессионного и дискриминантного анализа построена многоуровневая математическая модель, описывающая зависимости параметров огнестойкости и механических свойств огнезащищенного полимерного композита от суммарной концентрации комплексного замедлителя горения в полиамидной матрице и относительного содержания в нем 5 компонентов, определены коэффициенты в уравнении регрессии. Разработана комплексная математическая модель, позволяющая с учетом приоритетных значений эксплуатационных параметров огнезащищенного полимерного композита выявить оптимальный состав многокомпонентного замедлителя горения.

Область применения исследований. Разработанная математическая модель позволяет определить оптимальный состав комплексного замедлителя горения для тугоплавких полимеров и его концентрации в полимерном композите в соответствии с требованиями к его важнейшим эксплуатационным параметрам: огнестойкости категории ПВ-0 при минимальном снижении физико-механических свойств.

Ключевые слова: теоретическое моделирование, регрессионный анализ, дискриминантный анализ, нетоксичные многокомпонентные замедлители горения, огнестойкие полиамидные композиты.

(Поступила в редакцию 14 января 2026 г.)

Введение

Наиболее распространенным и эффективным способом снижения горючести полимерных материалов и композитов на их основе является внесение замедлителей горения в полимерную матрицу методом экструзии в расплав [1–4]. Для полиамидов одним из главных классов замедлителей горения твердофазного действия, описанных во многих работах [5–9], являются органические соединения фосфора, которые могут быть допированы галогенсодержащими и фосфор-галогенидными антипиренами. Для повышения эффективности замедлителя горения полимерный композит в дополнение к фосфорорганическому соединению может содержать активирующее вещество, например производные меламина, пентаэритрита, неорганические соединения металлов, слоистые двойные гидроксиды, полимеры простого полифениленового эфира [5]. Весьма эффективными для придания огнестойкости полиамамидам являются синергические смеси, включающие оксид сурьмы и галогенсодержащие органические соединения [10–15]. В качестве неорганических антипиренов для полиамидов описаны красный фосфор и полифосфат аммония, а также некоторые глинистые минералы: каолинит, монтмориллонит и гидрослюды, содержащие в качестве примесей кварц и карбонаты кальция, магния, железа, бария, натрия, меди и других металлов [5; 10; 15–17].

Несмотря на высокую эффективность фосфор- и галогенсодержащих органических замедлителей горения, при термодеструкции модифицированных ими полиамидных материалов выделяются высокотоксичные продукты их разложения. В случае малотоксичных

неорганических замедлителей горения часто не обеспечивается необходимый уровень огнезащиты полиамида, поскольку неорганические вещества плохо совмещаются с высокомолекулярной матрицей, а необходимая категория стойкости материала к горению достигается только при достаточно высоком содержании (до 30 и более масс. %) огнезащитной смеси [16; 18].

Кроме того, повышение концентрации примесей другой химической природы отрицательно сказывается на прочностных характеристиках полученного композиционного полимерного материала, поскольку физико-механические свойства полиамидов весьма чувствительны к внесению примесей и очень плохо прогнозируемы, несмотря на обилие накопленных экспериментальных данных и новые теории синтеза композиционных материалов с заданными свойствами [18; 19].

Таким образом, решение комплексной задачи эффективной огнезащиты тугоплавких полимеров, к которым относится полиамид, возможно путем разработки новых многокомпонентных замедлителей горения синергического действия, оптимально сочетающих органические и неорганические компоненты газофазного, твердофазного и структурирующего действия, препятствующие не только горению полимерного композита, но и его растеканию, а также выделению токсичных газов. При эмпирическом составлении многокомпонентного замедлителя горения требуется проведение очень значительного количества экспериментов, поскольку его совокупное огнезащитное действие является сложным и многофакторным физико-химическим процессом, протекающим одновременно в нескольких фазах, что упоминается во многих литературных источниках [20; 21], и не является простой суммой действия отдельных компонентов. К тому же огнестойкость полимерного материала нельзя рассматривать в отрыве от влияния химического состава и концентрации огнезащитной композиции на физико-механические свойства получаемых материалов, многие из которых при внесении примесей изменяются не только нелинейно, но и не взаимосвязанно [18; 19].

Математическое моделирование позволяет существенно сократить объем экспериментов, однако в системах «полимер – комплексный антипирен» построение адекватной модели весьма затруднительно, поскольку не только велико количество значимых факторов, но и для каждой системы мало предсказуемо их взаимодействие. В основном применительно к огнезащите полимерных материалов в литературных источниках встречаются работы, в которых проводится построение относительно несложных математических моделей для процессов тепломассопереноса при горении различных материалов [22], формирования малокомпонентных антипиренов [23–25] с варьированием ограниченного количества факторов.

В работах [26–29] изложены более многофакторные математические модели применительно к созданию огнестойких материалов. Так, в работе [26] методом теоретического моделирования получена рецептура металлофосфатной системы с улучшенными огнезащитно-огнетушащими свойствами по отношению к торфу и древесине; выявлено, что исследуемые металлофосфатные системы для торфа и древесины проявляют комплексный механизм огнетушащего действия. В работе [27] оптимизировано не только соотношение компонентов жидкофазной полимерной термогерметизирующей композиции и параметров технологического процесса; но и прочностные характеристики полученного в результате материала для защитных костюмов. Работы [28; 29] помимо оптимизации рецептуры термовспениваемых полимерных композитов выявляют, что преобладающее влияние на огнестойкость системы и ее термоизолирующие свойства оказывает образование механически прочной вспененной коксовой структуры.

Моделей, полноценно описывающих зависимость не только огнестойкости, но и физико-механических свойств огнезащищенного полимерного композита от состава и концентрации компонентов замедлителя горения, в литературных источниках не обнаружено. В связи с этим при модификации полиамида-6 многокомпонентным антипиреном синергического действия в представленном исследовании использован подход, сочетающий экспериментальные и расчетные методы.

Целью данной работы является построение адекватной математической модели состава комплексного замедлителя горения для полиамида-6 с заданной целевой функцией и применение ее для моделирования оптимальных характеристик состава замедлителя горения (обеспечивающего огнестойкость полученного композиционного материала категории ПВ-0 и снижение основных физико-механических характеристик не более чем на 8–10 % по сравнению с исходным полиамидом).

За основу многокомпонентного замедлителя горения была выбрана смесь нетоксичных и экологически безопасных нестехиометрических аммонийных металлофосфатов (НЗГ). При накоплении экспериментальных данных для построения многофакторной математической модели в расплав полиамида-6 (220–240 °С) при интенсивном перемешивании вносили огнезащитные композиции на основе НЗГ с рядом структурирующих или газовыделяющих минеральных и органических добавок в количестве от 5 до 18 масс. %. Из полученной однородной массы на термопластавтомате Dr.Boyu 22A получали образцы для дальнейших испытаний.

Огневые испытания модифицированных полимерных композитов проводили по ГОСТ 28157-2018¹ на горелке Бунзена не менее 3 пластин на точку. Испытания физико-механических свойств полученных материалов проводили по ГОСТ 11645-2021², ГОСТ 11262-2017³, ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000)⁴, ГОСТ 4647-2015 (ISO 179-1:2010)⁵, ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010)⁶ с испытанием не менее 10 образцов на точку.

Основная часть

Спецификация модели.

С целью определения оптимального состава многокомпонентного замедлителя горения и его концентрации в полиамидном композите выполнено экспериментальное исследование и статистический анализ результатов влияния 5 компонентов (входных факторов) в составе антипирена на огнестойкость и физико-механические свойства огнезащитного композитного полимерного материала. Перечень компонентов, интервалы варьирования и число уровней которых приведены в таблице 1.

При реализации опытов комбинации уровней выбирались исходя из количественного состава компонентов в антипирене, вводимом в полиамид-6. Весьма важным является наличие взаимного влияния варьируемых уровней, в связи с чем результаты анализа распределения и сочетания уровней варьируемых факторов в нормированных координатах приведены на рисунке 1 и в таблице 2.

Поскольку графики взаимных распределений уровней входных факторов (рис. 1) не указывают на их статистически значимую взаимозависимость, очевидно требуется включить все перечисленные факторы в математические модели в качестве независимых переменных.

Таблица 1. – Интервалы варьирования и число уровней компонентов антипирена (входные факторы)

Компонент	Фактор	Min	Max	Уровни
НЗГ, %	X_1	4	12	11
Суперфосфат, %	X_2	0	1	2
Гранит, %	X_3	0	1	4
Меламин + пентаэритрит, %	X_4	1	2	4
NH_4Cl , %	X_5	0	2	6

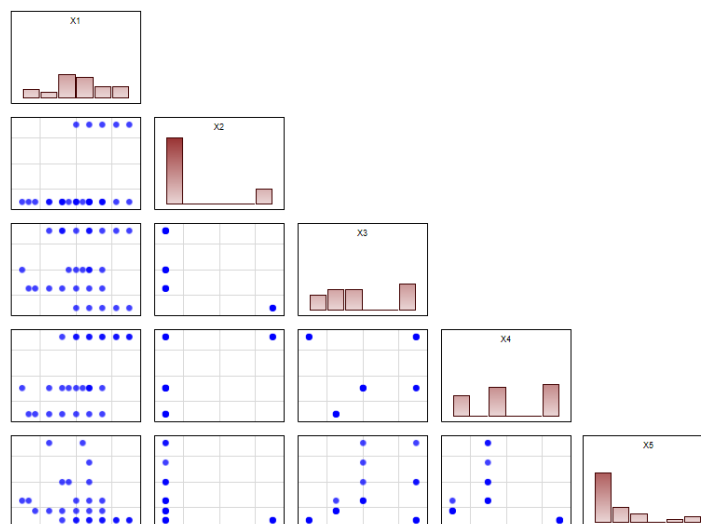


Рисунок 1. – Графики распределения уровней варьируемых факторов

¹ Пластмассы. Методы определения стойкости к горению: ГОСТ 28157-2018. – Взамен ГОСТ 28157-89; введ. 01.02.2019. – М.: Стандартинформ, 2018. – III, 8 с.

² Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава: ГОСТ 11645-2021. – Взамен ГОСТ 11645-73; введ. 01.09.2022. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – III, 25 с.

³ Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). – Взамен ГОСТ 11262-80; введ. 01.10.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – IV, 20 с.

⁴ Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду: ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000). – Взамен ГОСТ 19109-84; введ. 01.10.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – IV, 15 с.

⁵ Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи: ГОСТ 4647-2015. – Взамен ГОСТ 4647-80; введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – IV, 20 с.

⁶ Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб: ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010). – Взамен ГОСТ 4648-71; введ. 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – III, 22 с.

Таблица 2. – Сочетания уровней входных факторов в натуральных и нормированных координатах

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Нормированные факторы				
						X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1

Согласно матрице многофакторного эксперимента (табл. 2) были изготовлены образцы огнезащитного полиамидного материала и измерены две группы важнейших выходных параметров – свойства огнестойкости (Y₁–Y₅) и механические свойства (Y₆–Y₉) (табл. 3). Все параметры, согласно требованиям ГОСТ, измерялись на 5–10 образцах в каждом опыте, а в таблице 3 указаны их средние значения.

Таблица 3. – Экспериментальные значения свойств огнезащитных полимерных композитов (выходные параметры)

№	Свойства огнестойкости					Механические свойства			
	Время горения, с	Потеря массы, мг	Растекание образца, +/-	Стойкость к горению	Особенности горения	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Прочность при разрыве, МПа	Модуль Юнга при изгибе, МПа	Предел текучести расплава, г/10 мин
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉
1	0	15	-	ПВ-0	Вспучивается	42,39	54,7	2810	60
2	0	15	-	ПВ-0	Вспучивается	44,2	56	2785	58
3	20	70	+	ПВ-2	Пламя обрывается с каплей	46,3	58,62	2760	56
4	37	90	+	ПВ-2 или -		45	59,98	2725	54

Продолжение таблицы 3

№	Свойства огнестойкости					Механические свойства			
	Время горения, с	Потеря массы, мг	Расстояние образца, +/-	Стойкость к горению	Особенности горения	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Прочность при разрыве, МПа	Модуль Юнга при изгибе, МПа	Предел текучести расплава, г/10 мин
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉
5	90	110	+	–	Горит постоянно	50,1	61,2	2700	53
6	0	17	–	ПВ-0	Вспучивается	43	53,2	2802	60
7	0	17	–	ПВ-0	Вспучивается	44,35	56,23	2780	58
8	5	29	+	ПВ-1		46,4	58,28	2756	56
9	8	42	+	ПВ-1		49,8	60,67	2720	54
10	5	26	+	ПВ-1 или ПВ-2		50,12	61,9	2695	52
11	8	44	+	ПВ-2		50,6	65,2	2671	50
12	4	22	+	ПВ-1		49,45	61,13	2718	54
13	9	49	+	ПВ-1		49,2	59,88	2724	55
14	8	43	+	ПВ-1 или ПВ-2		49,9	60	2726	54
15	0	15	–	ПВ-0	Вспучивается	49,79	60,5	2722	54
16	4	23	+	ПВ-1		50,17	63,3	2693	52
17	7	36	+	ПВ-1 или ПВ-2		50,44	66,6	2670	50
18	20	64	+	ПВ-2	Пламя обрывается с каплей	50,62	66,7	2667	49
19	32	72	+	ПВ-2	Пламя обрывается с каплей	50,39	66,48	2665	51
20	41	85	–	ПВ-2 или –	Горит медленно, но постоянно	50,28	66,82	2673	49
21	21	64	–	ПВ-1		50,05	63,6	2697	52
22	26	69	–	ПВ-1		51,2	65,9	2664	51
23	33	78	–	ПВ-1		56,72	67,1	2630	42
24	37	84	–	ПВ-1		63,24	67,66	2590	37
25	55	87	+	ПВ-2		63,8	68,1	2545	32
26	68	93	+	ПВ-2		65,6	69,16	2520	27
27	77	96	+	ПВ-2		66,4	69,27	2518	28
28	90	112	+	ПВ-2 или –		67,2	69,4	2522	27

Исключая X_2 , остальные факторы варьировались на более чем двух уровнях, что позволяет использовать для описания влияния варьируемых факторов на исследуемые параметры полиномиальную модель 2-го порядка для всех факторов, за исключением фактора X_2^2 . Кроме того, большое количество уровней варьирования факторов X_1 и X_5 может обусловить значимость их кубических эффектов, которые также включены в модель. Таким образом, в качестве общей модели для поиска зависимости свойств огнезащитенного полимерного композита (выходных параметров Y_k) от состава и концентрации компонентов антипирена (входных факторов X) выбран полином вида:

$$Y_k = b_{0k} + \sum_{i=1}^5 b_{ik} X_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^5 b_{ijk} X_i X_j + \sum_{i=1, i \neq 2}^5 b_{iik} X_i^2 + b_{111k} X_1^3 + b_{555k} X_5^3, \quad k = \overline{1,9}. \quad (1)$$

Выходные параметры огнестойкости. Огнестойкость характеризуется двумя количественными параметрами Y_1 , Y_2 и тремя качественными Y_3 – Y_5 . Параметр Y_5 зафиксирован менее, чем в половине экспериментов, поэтому из дальнейшего анализа исключен.

Графики распределений наблюдаемых значений выходных параметров огнестойкости (рис. 2) показывают тесную взаимозависимость параметров Y_1 и Y_2 , что логично, т.к. большее время горения будет приводить к большей потере массы. Основным показателем огнестойкости материала является время горения (Y_1), поэтому потерю массы (Y_2) выразим

как функцию от времени горения (рис. 3). Для аппроксимации функциональной зависимости между этими параметрами использована логарифмическая функция вида:

$$Y_2 = 36 \ln(Y_1 + 7) - 56. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции экспериментальных и рассчитанных по уравнению (2) значений параметров Y_1 (время горения) и Y_2 (потеря массы) равен 0,99, что подтверждает их тесную взаимосвязь.

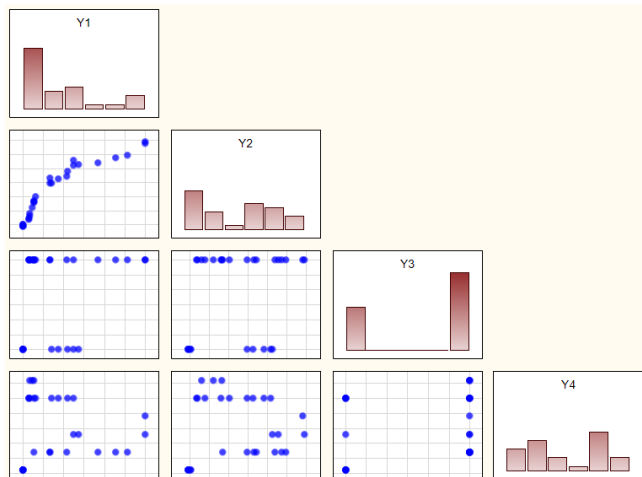


Рисунок 2. – Графики распределения выходных параметров огнестойкости

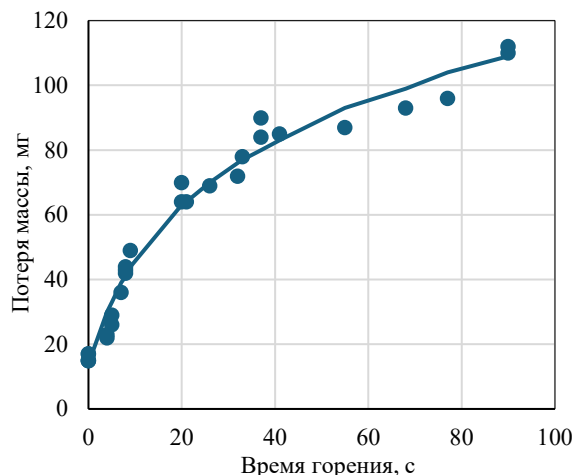


Рисунок 3. – Зависимость потери массы образца от времени горения

Определение зависимости времени горения (Y_1) от варьируемых факторов с помощью функции выполнено в программе Statistica (TIBCO Software Inc.) с помощью процедуры «Обобщенные линейные и нелинейные модели» (GLZ) [30]. В качестве регрессионной зависимости выбрана модель с логарифмической функцией связи и нормальным распределением параметра:

$$\ln(Y_1) = F(X_1, X_2, \dots X_5).$$

Выбор логарифмической функции основан на том, что наибольший интерес представляет описание зависимости времени горения в области значений, близких к нулю, а погрешности аппроксимации с помощью степенных полиномов могут привести к появлению отрицательных расчетных значений в этой области. Коэффициенты регрессии рассчитывались пошаговым методом с исключением эффектов, не значимых по критерию Фишера. В результате получена следующая зависимость:

$$\ln(Y_1) = 10,272 - 5,064X_1 + 6,099X_2 + 3,832X_4 + 5,315X_5 + 1,248X_1X_3 - 1,579X_1X_4 - 4,341X_1X_5 + 2,195X_3X_4 - 2,576X_3X_5 + 7,990X_4X_5 - 0,267X_1^3 - 2,375X_5^3. \quad (3)$$

Рассчитанные по уравнению (3) значения времени горения представлены в таблице 4.

На основе полученного уравнения решена задача прогноза состава антипирена, который обеспечивает минимальное время горения. Задача решена путем поиска минимума функции при ограничениях на факторы, соответствующие их интервалам варьирования:

$$Y_1(X_1 \dots X_5) \rightarrow \min, \quad -1 \leq X_1 \dots X_5 \leq 1.$$

Таблица 4. – Расчетные и экспериментальные значения времени горения модифицированного полиамида

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Нормированные факторы					Время горения, с	
						X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y ₁ , расч.
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	0	2,0
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	0	5,6
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	20	14,8
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	37	37,0

Продолжение таблицы 4

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Нормированные факторы					Время горения, с	
						X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y _{1, расч.}
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	90	90,2
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	0	1,7
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	0	2,6
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	5	3,6
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	8	4,8
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	5	6,3
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	8	8,3
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	4	3,8
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	9	9,4
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	8	7,9
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	0	1,9
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	4	3,6
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	7	6,5
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	20	19,9
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	32	31,9
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	41	41,0
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	21	20,5
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	26	26,1
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	33	32,5
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	37	40,4
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	55	51,5
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	68	69,0
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	77	77,0
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	90	90,1

Расчеты выполнены в программе PTC Mathcad Prime (PTC Inc.) [31] методом сопряженных градиентов с перебором 100 случайных стартовых точек. В результате получен граничный экстремум, указывающий, что минимальное время горения может быть достигнуто при концентрации компонентов, указанной в таблице 5.

Таблица 5. – Концентрация компонентов антипирена, обеспечивающая минимальное время горения согласно расчетам

Компонент	Фактор	Нормированный	Натуральный
НЗГ, %	X ₁	1	12
Суперфосфат, %	X ₂	-1	0
Гранит, %	X ₃	1	1
Меламин + пентаэритрит, %	X ₄	-1	1
NH ₄ Cl, %	X ₅	1	2

На рисунке 4 показаны расчетные значения уровней параметра «Время горения» в оптимальной области состава антипирена.

Согласно расчетам концентрация NH₄Cl более 0,5 % должна обеспечить малые значения времен горения, причем в этом случае влияние добавок НЗГ будет незначительным. Однако одним из важнейших условий составления нового комплексного замедлителя горения является отсутствие или минимизация содержания галогенсодержащих компонентов. Таким образом, повышение концентрации высокоэффективного компонента NH₄Cl более 0,5 % недопустимо.

Качественный параметр Y₃ разделяет характер горения в эксперименте на две категории: «+» – есть растекание образца, «-» – нет растекания образца. Для построения математической модели, классифицирующей характер горения по этим признакам в зависимости от варьируемых факторов, использован метод дискриминантного анализа. В качестве математической модели использовано уравнение (1). Расчет коэффициентов дискриминантных функций выполнен в программе Statistica (TIBCO Software Inc.) с помощью процедуры «Общие модели дискриминантного анализа» (GDA). Коэффициенты дискриминантных функций

рассчитывались пошаговым методом с включением эффектов, значимых по критерию Фишера. В результате проведенных расчетов установлено, что из всех коэффициентов уравнения (1) статистически значимыми (со среднеквадратичным отклонением для коэффициента меньшим, чем среднеквадратичное отклонение для самого параметра) являются только коэффициенты X_1X_5 , X_4X_5 и X_5^2 , численные значения которых приведены в таблице 6.

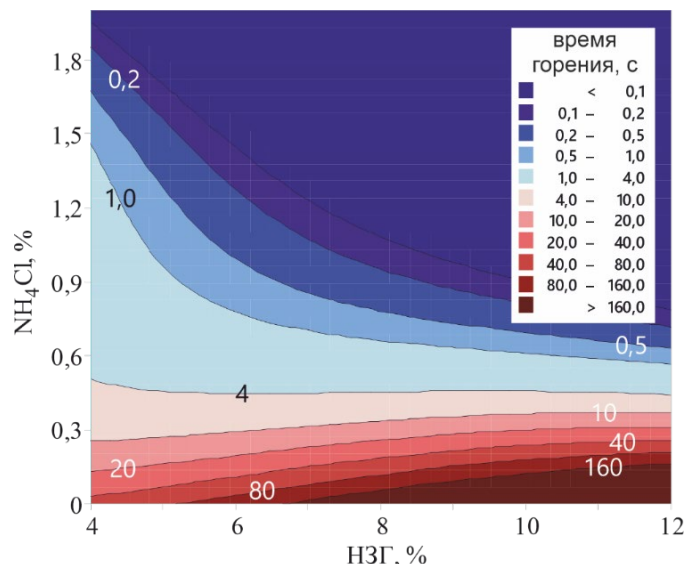


Рисунок 4. – Зависимость времени горения от изменения концентраций НЗГ и NH_4Cl при наличии в составе антипирена 1 % гранита и 1 % меламина + пентаэритрита

Величины коэффициентов дискриминантных функций при подстановке полученных значений в уравнение (1) показывают, что факторы X_2 (суперфосфат) и X_3 (гранит) не оказывают статистически существенное влияние на растрескивание. Наибольшее влияние оказывает фактор X_5 (NH_4Cl), причем во взаимодействии с факторами X_1 (НЗГ) и X_4 (меламин + пентаэритрит). Дискриминантные функции для классификации по двум категориям параметра «растрескивание образца» выражены как:

Таблица 6. – Статистически значимые коэффициенты дискриминантных функций по параметру «растрескивание образца»

Эффект	Нет растрескивания (-)	Есть растрескивание (+)
Const	-8,75	-2,20
X_1X_5	-13,96	1,34
X_4X_5	10,39	1,51
X_5^2	13,59	6,76

$$D^- = -8,75 - 13,96X_1X_5 + 10,39X_4X_5 + 13,59X_5^2; \quad (4)$$

$$D^+ = -2,20 + 1,35X_1X_5 + 1,51X_4X_5 + 6,75X_5^2. \quad (5)$$

Опыт будет отнесен к соответствующей категории в зависимости от того, какая из функций принимает максимальное значение. Отсюда можно вывести функцию, которая будет принимать значения «+1» или «-1» для прогнозирования растрескивания образца или его отсутствия:

$$Y_3 = \text{sign}(D^+ - D^-) = \text{sign}(6,55 + 15,31X_1X_5 - 8,88X_4X_5 - 6,84X_5^2). \quad (6)$$

Результаты классификации с помощью этих функций совпадают во всех экспериментах с наблюдаемым растрескиванием (табл. 7).

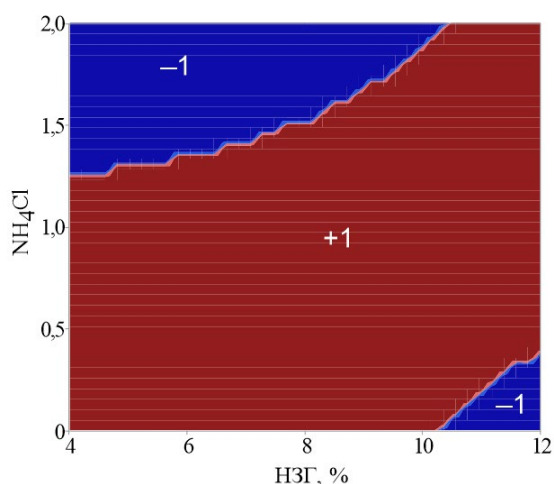
Сочетание влияющих факторов на растрескивание образца наглядно иллюстрируется графиками уровней функции в координатах концентрации НЗГ и NH_4Cl (рис. 5).

При добавках смеси меламина и пентаэритрита (компонента, отвечающего как за выделение инертных газов при термодеструкции композита, так и за формирование в твердой фазе смолоподобных продуктов поликонденсации, таких как аммелин (4,6-диамино-2-гидрокси-1,3,5-триазин) и аммелид (6-амино-2,4-дигидрокси-1,3,5-триазин) в количестве

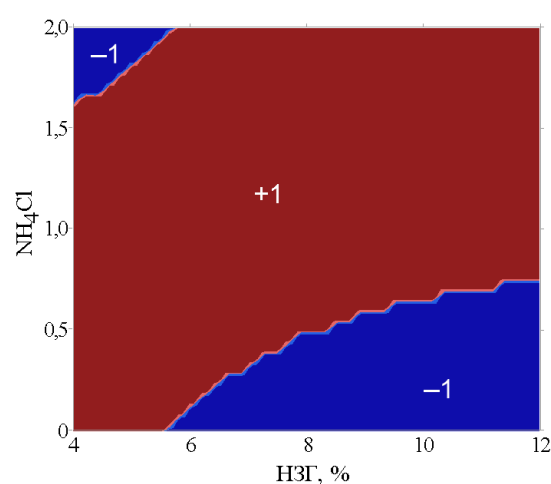
2 % (рис. 5а) отсутствие растекания прогнозируется при концентрации NH_4Cl 1,25–2 % и НЗГ 4–10 %. Вторую область без растекания ограничивают концентрации НЗГ 10–12 %, $\text{NH}_4\text{Cl} < 0,25\%$.

Таблица 7. – Экспериментальные значения и результаты классификации по параметру «Растекание образца» по дискриминантным функциям

№	НЗГ, %	сульфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Нормированные факторы					Растекание образца			
						X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_3	D^+	D^-	Y_3 , прогн.
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	-	1,71	8,42	-
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	-	2,04	4,93	-
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	+	2,38	1,44	+
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	+	2,71	-2,05	+
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	+	3,05	-5,55	+
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	-	1,71	8,42	-
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	-	2,04	4,93	-
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	+	2,38	1,44	+
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	+	2,71	-2,05	+
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	+	3,05	-5,55	+
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	+	3,38	-9,04	+
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	+	-2,20	-8,75	+
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	+	-0,59	-8,83	+
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	+	4,22	-0,37	+
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	-	-0,60	-0,13	-
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	+	-0,43	-1,88	+
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	+	-0,26	-3,62	+
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	+	-2,20	-8,75	+
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	+	-2,20	-8,75	+
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	-	3,38	8,36	-
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	-	2,23	11,92	-
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	-	2,48	9,30	-
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	-	2,73	6,69	-
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	-	2,98	4,07	-
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	+	3,23	1,45	+
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	+	3,49	-1,17	+
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	+	0,58	-8,00	+
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	+	0,41	-10,60	+



а – при добавке 2 % меламин + пентаэритрита



б – при добавке 1 % меламин + пентаэритрита

Рисунок 5. – Области, в которых прогнозируется отсутствие растекания образца при горении (синие)

При добавках смеси меламина и пентаэритрита в количестве 1 % (рис. 5б) распределение областей отсутствия растекания изменяется по центральной симметрии относительно предыдущей картины. Отсутствие растекания прогнозируется при концентрации NH_4Cl 1,6–2 % и НГЗ 4–6 % либо $\text{NH}_4\text{Cl} < 0,6$ % и НГЗ 6–12 %. При этом оба компонента в составах нужно увеличивать одновременно на границах диапазонов; однако второй вариант более предпочтителен по экологическим параметрам. Кроме того, следует подробнее изучить действие других каркасообразующих компонентов, препятствующих растеканию полиамидного композита (суперфосфат и гранит).

Параметр «стойкость к горению» Y_4 категориальный, представлен 6 классами (табл. 8).

Таблица 8. – Категории параметра «стойкость к горению»

Класс	1	2	3	4	5	6
Категория	ПВ-0	ПВ-1	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-2	ПВ-2 или –	–

Для построения математической модели, прогнозирующей стойкость к горению по указанным классам в зависимости от варьируемых факторов, использован, как и при изучении характера горения, метод дискриминантного анализа. В модель включены эффекты, которые содержатся в уравнении, и дополнительно включен параметр Y_3 «растекание образца», как 2-уровневый фактор (+1 при растекании и –1 без растекания).

Коэффициенты дискриминантных функций представлены в таблице 9, прогнозируемые на их основе значения параметра – в таблице 10. Результат прогнозирования находится при заданных в нормированных координатах факторах X_1 – X_5 путем сравнения 6 значений, рассчитанных по коэффициентам дискриминантных функций (табл. 9). Наблюдение относится к тому классу, дискриминантная функция для которого максимальна.

Результаты прогнозирования по дискриминантным функциям дали 26 совпадений с экспериментальными значениями, что составляет 93 %, причем два ошибочных прогноза приходится на пограничные случаи ПВ-1 или ПВ-2 (№ 11, 17).

Таблица 9. – Статистически значимые коэффициенты дискриминантных функций для параметра «стойкость к горению»

Эффект	ПВ-0	ПВ-1	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-2	ПВ-2 или –	–
$Const$	–12,50	–14,48	–25,33	–29,37	–50,83	–89,45
X_1	35,13	–22,83	–42,71	–62,78	–104,22	–129,16
X_4	4,06	–21,52	–24,40	–27,83	–26,23	–28,08
X_1X_3	–8,05	3,71	8,07	12,91	33,35	59,08
X_1X_4	22,79	–20,19	–32,12	–37,99	–61,58	–88,11
X_1X_5	25,43	–37,49	–51,58	–69,52	–98,08	–110,48
X_3X_4	8,85	–3,62	–9,17	–15,01	–33,99	–55,03
X_5^2	–12,11	27,37	42,27	44,87	62,87	82,99
X_5^3	4,84	–11,64	–11,88	–18,90	–23,09	–33,53
Y_3	–8,63	16,60	23,25	26,03	27,07	28,77

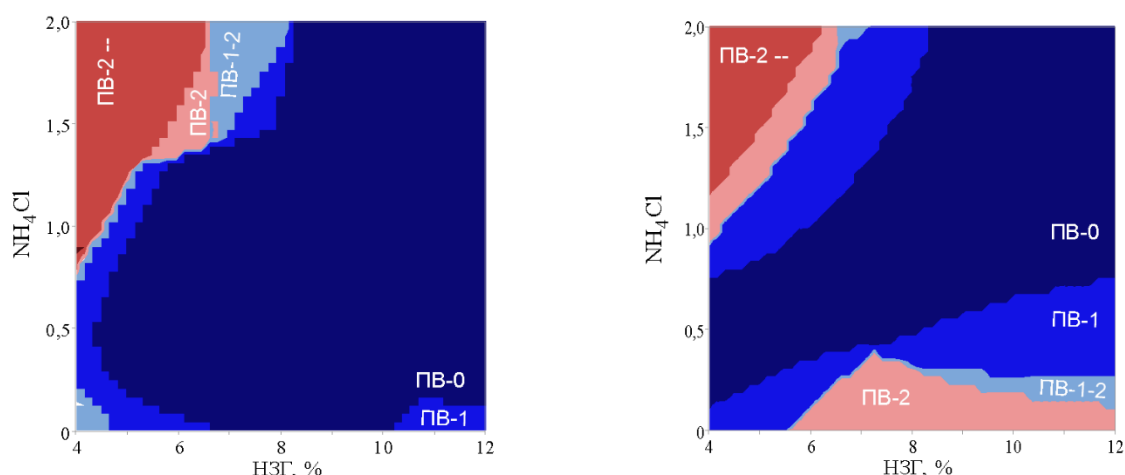
Таблица 10. – Экспериментальные значения и результаты классификации по параметру «Стойкость к горению» по дискриминантным функциям

№	НГЗ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Растекание образца	Стойкость к горению	
							Y_3	Y_4 , прогноз.
1	12	1	0	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
2	11	1	0	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
3	10	1	0	2	0	+	ПВ-2	ПВ-2
4	9	1	0	2	0	+	ПВ-2 или –	ПВ-2 или –
5	8	1	0	2	0	+	–	–
6	12	0	1	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
7	11	0	1	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
8	10	0	1	2	0	+	ПВ-1	ПВ-1

Продолжение таблицы 10

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Растекание образца	Стойкость к горению	
							Y ₃	Y ₄ , прогноз.
9	9	0	1	2	0	+	ПВ-1	ПВ-1
10	8	0	1	2	0	+	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-1 или ПВ-2
11	7	0	1	2	0	+	ПВ-2	ПВ-1 или ПВ-2
12	9	0	1	1	1	+	ПВ-1	ПВ-1
13	9	0	0,5	1	1,5	+	ПВ-1	ПВ-1
14	8,5	0	0,5	1	2	+	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-1 или ПВ-2
15	10	0	0,5	1	0,5	-	ПВ-0	ПВ-0
16	9	0	0,5	1	0,5	+	ПВ-1	ПВ-1
17	8	0	0,5	1	0,5	+	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-2
18	7	0	1	1	1	+	ПВ-2	ПВ-2
19	7,5	0	0,5	1	1	+	ПВ-2	ПВ-2
20	6	0	1	1	2	-	ПВ-2 или -	ПВ-2 или -
21	10	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
22	9	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
23	8	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
25	6	0	0,3	0,5	0,3	+	ПВ-2	ПВ-2
26	5	0	0,3	0,5	0,3	+	ПВ-2	ПВ-2
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	+	ПВ-2	ПВ-2
28	4	0	0,5	1	0,5	+	ПВ-2 или -	ПВ-2 или -

Для поиска оптимального состава антиперена по параметру «стойкость к горению» использован метод сечений дискриминантной функции в плоскости факторов X₁ и X₅ при варьировании факторами X₃ и X₄. В каждом сечении определялась относительная доля классов 1 и 2 (ПВ-0 и ПВ-1). В результате получено, что наилучшие результаты могут быть достигнуты для составов, отвечающих темно-синей зоне, представленных на рисунке 6.



а – 6 % меламина + пентаэритрита и 4 % гранита: P = 0,83

б – 2 % меламина + пентаэритрита и 2 % гранита: P = 0,77

Рисунок 6. – Составы антиперена, обеспечивающие стойкость к горению ПВ-0 и ПВ-1 с вероятностью P

Механические свойства полиамидного композита в данной теоретической модели характеризуются четырьмя важнейшими количественными параметрами (табл. 3). Графики взаимных распределений механических параметров указывают на их статистически значимую взаимосвязь, близкую к линейной (рис. 7), что вполне ожидаемо, т.к. кристаллическая структура полиамидов, и соответственно, физико-механические свойства, чрезвычайно чувствительны к наличию и концентрации примесей другой химической природы [18; 19].

Приведенные графики (рис. 7) и коэффициенты линейной корреляции (табл. 11) показывают очень высокую взаимозависимость механических свойств. Особенно тесная взаимосвязь между ударной вязкостью (Y_6), модулем Юнга (Y_8) и пределом текучести (Y_9). Прочность при разрыве (Y_7) имеет особенность во взаимосвязи с остальными факторами: на графиках виден излом линейной зависимости (рис. 8).

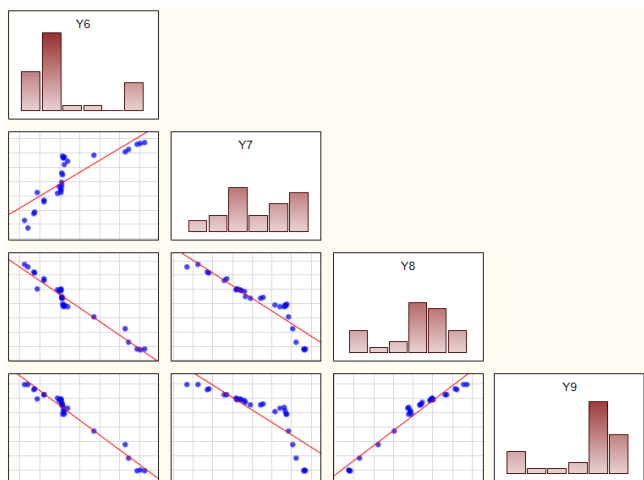


Рисунок 7. – Графики распределения наблюдаемых показателей механических свойств

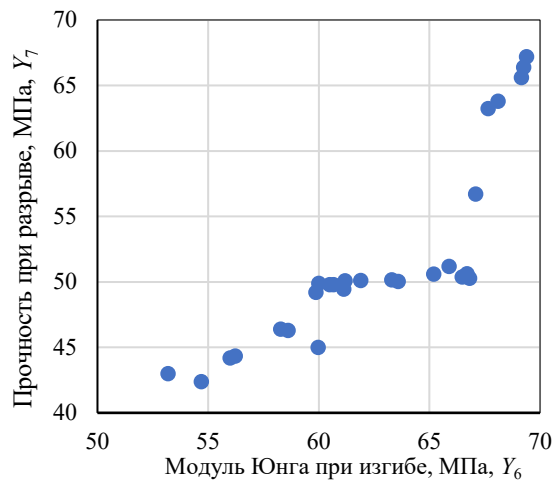


Рисунок 8. – Взаимозависимость модуля Юнга и прочности при разрыве

Таблица 11. – Коэффициенты линейной корреляции механических свойств

Параметры	Коэффициент корреляции		
	Y_6	Y_7	Y_8
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , Y_6	1		
Прочность при разрыве, МПа, Y_7	0,83	1	
Модуль Юнга при изгибе, МПа, Y_8	-0,97	-0,92	1
ПТР, г/10 мин, Y_9	-0,98	-0,83	0,97

В связи с этим целесообразно построить математические модели взаимосвязи только для параметров «ударная вязкость» (Y_6) и «прочность при разрыве» (Y_7) с факторами, варьируемыми в составе антипирена. Модуль Юнга и предел текучести могут быть выражены через ударную вязкость (рис. 9) и связаны уравнениями:

$$Y_8 = 3264 - 11,23Y_6; \quad (7)$$

$$Y_9 = 119 - 1,36Y_6. \quad (8)$$

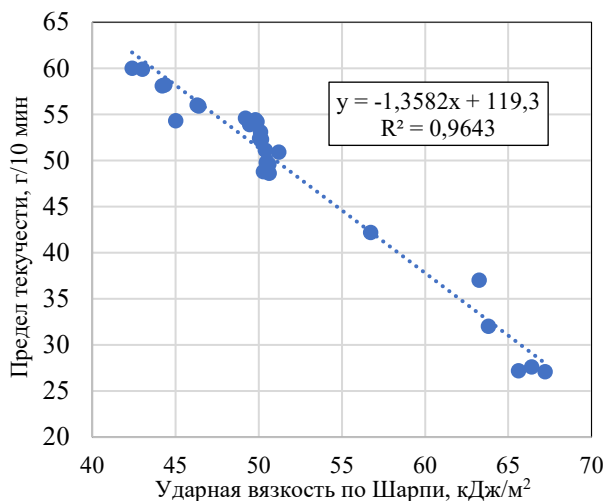
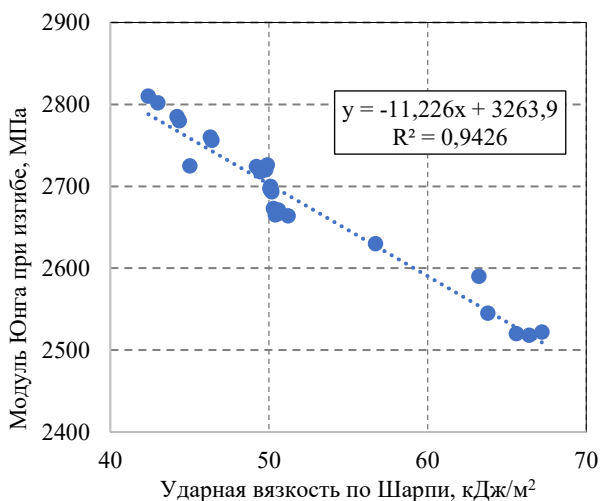


Рисунок 9. – Взаимосвязь ударной вязкости, модуля Юнга и предела текучести

Уравнение регрессии в нормированных координатах для описания зависимости ударной вязкости от составов антипирена с учетом статистической значимости коэффициентов имеет вид:

$$Y_6 = 48,1 - 6,23X_1 - 8,97X_4 + 5,31X_1X_2 + 6,15X_1X_3 - 10,63X_4^2 + 10,22X_5^2 - 10,57X_5^3. \quad (9)$$

Анализ коэффициентов уравнения показывает, что наибольшее влияние на ударную вязкость оказывает содержание смеси меламина с пентаэритритом и NH_4Cl .

Рассчитанные по уравнению значения ударной вязкости представлены в таблице 12.

Таблица 12. – Экспериментальные и расчетные значения ударной вязкости

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Нормированные факторы					Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	
						X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_6	Y_6 , расч.
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	42,39	42,21
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	44,2	43,98
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	46,3	45,74
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	45	47,51
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	50,1	49,28
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	43	43,89
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	44,35	45,23
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	46,4	46,58
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	49,8	47,93
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	50,12	49,28
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	50,6	50,62
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	49,45	48,55
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	49,2	48,24
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	49,9	48,11
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	49,79	48,00
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	50,17	50,89
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	50,44	53,77
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	50,62	51,24
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	50,39	51,34
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	50,28	52,24
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	50,05	49,33
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	51,2	52,98
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	56,72	56,64
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	63,24	60,29
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	63,8	63,94
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	65,6	67,59
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	66,4	66,00
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	67,2	65,31

На рисунке 10 показаны уровни ударной вязкости в зависимости от состава антипирена в области граничных максимумов. Максимальная расчетная ударная вязкость 88,5 кДж/м² прогнозируется для состава 4 % НЗГ и 1,3 % смеси меламина с пентаэритритом.

Уравнение регрессии в нормированных координатах для описания зависимости прочности при растяжении от составов антипирена с учетом статистической значимости коэффициентов имеет вид:

$$Y_7 = 63,5 - 8,37X_1 - 3,00X_4 - 2,31X_5 + 1,69X_1X_2 - 1,52X_1X_4 - 4,75X_1X_5 - 0,94X_3X_5 - 3,22X_1^2 - 1,13X_4^2. \quad (10)$$

Анализ коэффициентов уравнения показывает, что наибольшее влияние на прочность при растяжении оказывает содержание компонента НЗГ.

Рассчитанные по уравнению значения прочности при растяжении представлены в таблице 13.

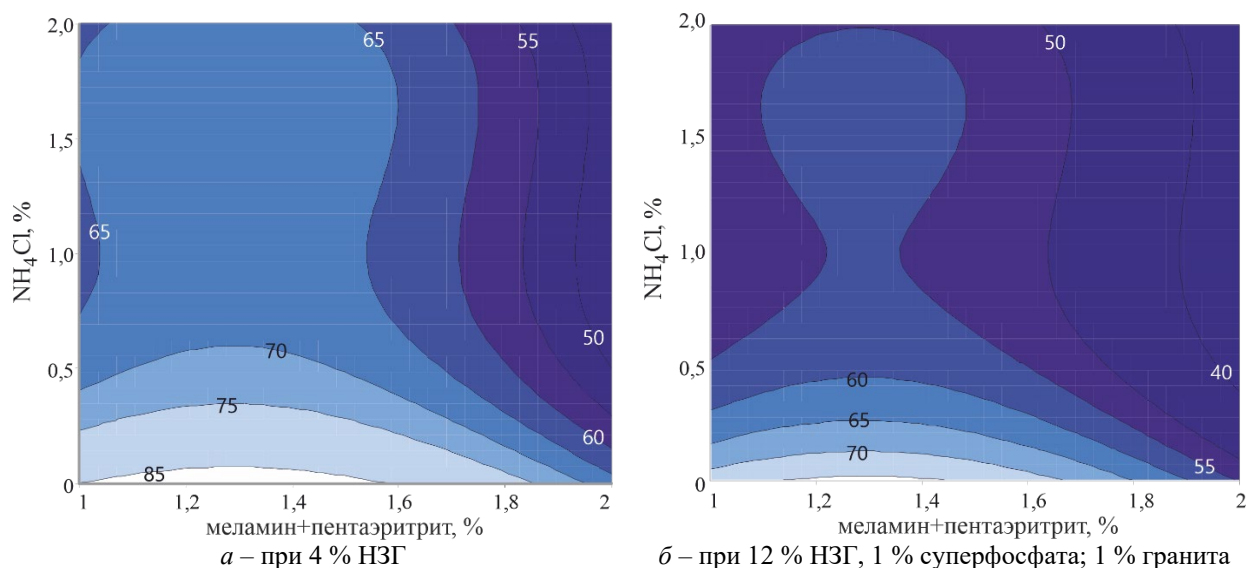


Рисунок 10. – Зависимость ударной вязкости от содержания меламина + пентаэритрита и NH_4Cl

Таблица 13. – Экспериментальные и расчетные значения прочности композита при разрыве

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Нормированные факторы					Прочность при разрыве, МПа	
						X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_7	$Y_7, \text{расч}$
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	54,7	54,33
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	56	56,60
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	58,62	58,47
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	59,98	59,93
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	61,2	61,00
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	53,2	52,83
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	56,23	55,94
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	58,28	58,66
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	60,67	60,97
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	61,9	62,87
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	65,2	64,38
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	61,13	61,74
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	59,88	59,85
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	60	59,89
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	60,5	61,25
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	63,3	63,64
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	66,6	65,64
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	66,7	66,52
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	66,48	65,48
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	66,82	67,14
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	63,6	63,64
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	65,9	65,48
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	67,1	66,93
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	67,66	67,97
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	68,1	68,61
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	69,16	68,85
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	69,27	69,39
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	69,4	69,59

На рисунке 11 показаны уровни прочности при разрыве в зависимости от состава антипирена в области максимумов. Максимальная расчетная прочность при растяжении 73,9 МПа прогнозируется для состава 4 % НЗГ, 1,2 % смеси меламина и пентаэритрита, 2 % NH_4Cl .

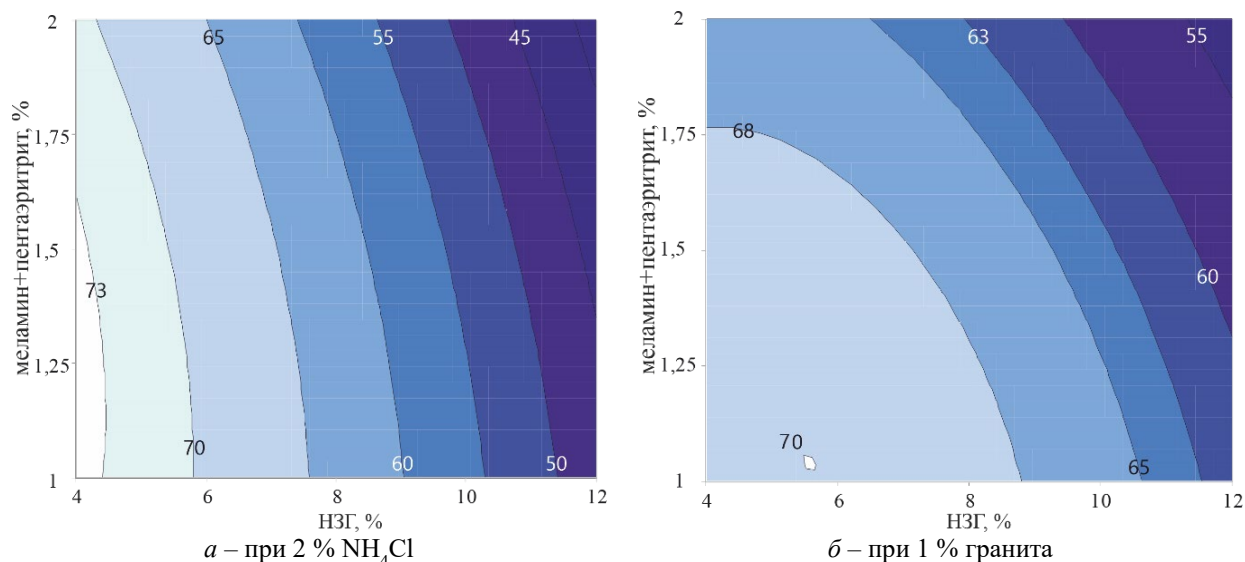


Рисунок 11. – Зависимость прочности при разрыве от содержания НЗГ и меламина + пентаэритрита

На основании построенной комплексной математической модели, описывающей взаимосвязь эксплуатационных параметров с составом антипирена (уравнения (2), (3), (6)–(10)), решена задача получения оптимальных характеристик состава замедлителя горения на основе приоритетных значений эксплуатационных параметров (табл. 14).

Таблица 14. – Значимость и требуемые уровни свойств антипирена

Значимость отклика	Показатель	Желаемый (допустимый) диапазон
1	t горения, с, Y_1	0–4 (до 15)
2	Потеря массы, мг, Y_2	15–30
3	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , Y_6	50–65 (не менее 45)
4	Прочность при разрыве, МПа, Y_7	55–70
5	Модуль Юнга при изгибе, МПа, Y_8	2500–2700
6	Растекание образца, +/-, Y_2	–
7	ПТР, г/10 мин, Y_9	25–45

В качестве целевой функции выбрано время горения Y_1 . Минимизация этого параметра (см. табл. 5) удовлетворяет требования ко всем остальным параметрам, за исключением ударной вязкости Y_6 , и в систему уравнений оптимизационной задачи добавлено ограничение по этому параметру:

$$\ln(Y_1) = 10,272 - 5,064X_1 + 6,099X_2 + 3,832X_4 + 5,315X_5 + 1,248X_1X_3 - 1,579X_1X_4 - 4,341X_1X_5 + 2,195X_3X_4 - 2,576X_3X_5 + 7,990X_4X_5 - 0,267X_1^3 - 2,375X_5^3 \rightarrow \min;$$

$$Y_6 = 48,1 - 6,23X_1 - 8,97X_4 + 5,31X_1X_2 + 6,15X_1X_3 - 10,63X_4^2 + 10,22X_5^2 - 10,57X_5^3 \geq 50,$$

$$-1 \leq X_i \leq 1, \quad i = \overline{1,5}.$$

Расчеты выполнены в программе PTC Mathcad Prime (PTC Inc.) [31] с перебором 100 случайных стартовых точек. Полученные данные приведены в таблице 15. В результате математического моделирования предложено 2 состава многокомпонентного замедлителя горения комплексного действия для полиамидных полимеров и его концентрация в композитном материале. Оба состава полностью отвечают поставленным требованиям: отсутствие галогенсодержащих и других токсичных компонентов; огнестойкость композиционного материала соответствует категории ПВ-0 согласно ГОСТ 28157-2018 при минимально допустимом снижении механической прочности полимерного композита.

Таблица 15. – Варианты состава антипирена, отвечающего требуемым критериям по всем выходным параметрам

Оптимальные значения факторов в нормированных координатах					НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Время горения, с	Потеря массы, мг	Растекание образца, +/-	Стойкость к горению	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Прочность при разрыве, МПа	Модуль Юнга при изгибе, МПа	Предел текучести расплава, г/10 мин
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅													
0,27	-0,97	-1,00	0,78	-0,99	9,1	0	0	1,9	0	0,0	14	-	ПВ-0	50	60	2702	51
0,38	-0,90	0,02	0,82	-1	9,5	0,05	0,5	1,9	0	0,1	15	-	ПВ-0	50	60	2701	51

Заключение

В соответствии с разработанным планом многофакторного эксперимента определено влияние на огнестойкость и механическую прочность полиамидного композиционного материала концентрации комплексного замедлителя горения, состоящего из неорганического комплекса аммонийных металлофосфатов (НЗГ), меламина, пентаэритрита и ряда минеральных добавок (суперфосфат, NH₄Cl; молотый гранит) с размером частиц не более 100 мкм в различных массовых соотношениях. На основе анализа результатов многофакторного эксперимента определены коэффициенты в уравнении регрессии, построена комплексная математическая модель, связывающая состав многокомпонентного замедлителя горения с огнестойкостью и физико-механическими свойствами огнезащищенного полиамидного композита. На основании построенной комплексной математической модели решена задача получения оптимальных характеристик состава замедлителя горения на основе приоритетных значений выходных эксплуатационных параметров (табл. 14). В качестве целевой функции выбрано время горения Y₁. Минимизация этого параметра (табл. 5) удовлетворяет требования ко всем остальным параметрам, за исключением ударной вязкости по Шарпи, на которую было наложено дополнительное требование ≥ 50 кДж/м². С помощью построенной комплексной математической модели определен состав многокомпонентного замедлителя горения, обеспечивающий полиамидному материалу наивысшую категорию стойкости к горению ПВ-0 при отсутствии растекания и минимальном снижении физико-механической прочности, из которого исключен экологически опасный галогенсодержащий компонент NH₄Cl: 9,1–9,5 % НЗГ, 0,5 % гранита, 1,9 % смеси меламина с пентаэритритом.

При анализе построенной комплексной модели установлена очень высокая взаимозависимость ряда физико-механических свойств огнезащищенного полиамида, что иллюстрируется величиной коэффициентов линейной корреляции в уравнениях (9), (10). Особенно тесная взаимосвязь обнаружена между ударной вязкостью (Y₆), модулем Юнга (Y₈) и пределом текучести (Y₉). Прочность при разрыве (Y₇) имеет отдельную особенность во взаимосвязи с остальными факторами. Таким образом, доказано, что задача получения оптимальных характеристик состава замедлителя горения и эксплуатационных свойств конечного огнезащищенного полиамидного композита может решаться только в комплексе.

Разработанная комплексная математическая модель может быть использована для проверки эффективности и выявления оптимального состава многокомпонентных замедлителей горения синергического действия для других тугоплавких полимеров без проведения значительного количества экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- Green, J. An overview of the fire-retardant chemicals industry, past-present-future / J. Green // Fire Materials. – 1995. – Vol. 19, No. 5. – P. 197–204.
- Кодолов, В.И. Замедлители горения полимерных материалов / В.И. Кодолов. – М.: Химия, 1980. – 274 с.
- Morgan, A.B. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions / A.B. Morgan, J.W. Gilman // Fire Materials. – 2013. – Vol. 37, No. 4. – P. 259–279. – DOI: 10.1002/fam.2128.
- Смайлс, С.К. Огнезащитные добавки для полимерных материалов: рынок, проблемы, пути решения / С.К. Смайлс // Полимерные материалы. Изделия. Оборудование. Технологии. – 2018. – № 11. – С. 50–58.

5. Патент RU 2535687 C2, МПК C09K 21/12 (2006.01), C09K 21/14 (2006.01), C08K 5/5397 (2006.01), C08K 7/14 (2006.01), C08L 77/00 (2006.01). Фосфорсодержащие антипирены: № 2011150488/05: заявлено 10.05.2010: опубл. 20.12.2014 / Тимберлейк Л.Д., Хансон М.В., Нараян С., Филдинг У.Р.; заявитель Кемтура Корпорейшн (US). – URL: <https://patenton.ru/patent/RU2535687C2> (дата обращения: 09.01.2026).
6. 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.
7. Патент RU 2679237 C1, МПК C08L 77/00 (2006.01), C09K 21/08 (2006.01), C09K 21/14 (2006.01). Фторсодержащая полиамидная композиция с пониженной горючестью: № 2018101540: заявлено 16.01.2018: опубл. 06.02.2019 / Кудашев С.В., Шаповалов В.М., Валенков А.М.; заявитель Волгоградский государственный технический университет. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2679237C1/ru> (дата обращения: 09.01.2026).
8. Леонов, Д.В. Разработка полиамида 6 функционального назначения, модифицированного окисленным графитом: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Леонов Дмитрий Владимирович; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. – Саратов, 2018. – 163 л.
9. Буравов, Б.А. Синтез и свойства полимеризационноспособных фосфорсодержащих олигомеров со спейсером в структуре: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.06 / Буравов Борис Андреевич; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2020. – 161 л.
10. Костюченко, М.А. Влияние триазинового и неорганического фосфорного ингибиторов горения на эксплуатационные свойства и стойкость к горению стеклонаполненного полиамида 6 / М.А. Костюченко, М.М. Ревяко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2013. – № 2. – С. 21–24. – EDN: VHRDLZ.
11. Богданова, В.В. Огнегасящий эффект замедлителей горения в синтетических полимерах и природных горючих материалах / В.В. Богданова // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. ст.: в 2 вып. / Бел. гос. ун-т, НИИ физ.-хим. проблем; под редакцией О.А. Ивашкевича. – Мн.: БГУ, 2003. – Вып. 2. – С. 344–375. – EDN: XMIFAD.
12. Ненахов, С.А. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония (обзор литературы) / С.А. Ненахов, В.П. Пименова // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 8. – С. 11–58. – EDN: MUVTGB.
13. Fire retardancy of polymeric materials / ed. by A.F. Grand, C.A. Wilkie. – New York; Basel: Marcel Dekker, 2000. – XIV, 572 p.
14. Fire retardant materials / ed. by A.R. Horrocks, D. Price. – CRC Press, Woodhead, 2001. – 444 p.
15. Богданова, В.В. Превращения сурьма-галоген- и азот-фосфорсодержащих антипиренов в полиолефинах и их огнегасящая эффективность / А.В. Богданова // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2001. – Т. 43, № 4. – С. 746–750. – EDN: RHXWAL.
16. Песецкий, С.С. Полиамидные нанокомпозиты пониженной горючести / С.С. Песецкий, Б. Юрковски, А.А. Давыдов // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. трудов XXIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 окт. 2010 г. / НАН Беларуси, Ин-т химии новых материалов; науч. ред.: В.Е. Агабеков [и др.]. – Мн.: Беларуская навука, 2011. – С. 184–194.
17. 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.
18. Берлин, А.А. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопов. – М.: Химия, 1990. – 238 с.
19. Баженов, С.Л. Полимерные композиционные материалы: прочность и технология / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 347 с.
20. Богданова, В.В. Механизм огнезадерживающего действия азот- и фосфорсодержащих антипиренов в полимерах различных классов / В.В. Богданова, О.И. Кобец, О.Н. Бурая // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. – 2023. – № 1. – С. 3–19. – DOI: 10.33581/2520-257X-2023-1-3-19. – EDN: GCPLNJ.
21. Богданова, В.В. Исследование основных рецептурных факторов, оказывающих доминирующее влияние на термоизолирующую способность и атмосферостойкость огнезащитных покрытий / В.В. Богданова, Д.Н. Арестович, В.П. Кирлица // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 4. – С. 24–31. – EDN: YOOTIV.
22. Чумаченко, С.Н. Методика создания математической модели энергетической составляющей химико-физических процессов, которые происходят в древесине при ее нагревании до начала фазы

- пламенного горения / С.Н. Чумаченко, С.В. Жартовский, А.Н. Титенко // *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. – 2016. – Vol. 44, No. 4. – P. 131–137. – DOI: 10.12845/bitp.44.4.2016.10. – EDN: YMDAQJ.
23. Метод трехфакторного планирования состава вспучивающегося антипирена / С.В. Илюшина, Р.Н. Фазуллина, А.Н. Минязова, И.Р. Замалиева // *Вестник технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 17. – С. 144–146. – EDN: UOSQND.
24. Леонович, А.А. Простой метод сравнительной оценки эффективности антипиренов / А.А. Леонович, М.Г. Глазунова // *Древесные плиты и фанера: теория и практика: сб. материалов XXIV Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 17–18 марта 2021 г. / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова*. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 47–55. – EDN: ROBZZV.
25. Бобрышева, С.Н. Применение метода дисперсионного анализа однофакторной математической модели для оптимизации состава полимеров с пониженной горючестью / С.Н. Бобрышева, Л.И. Буякевич, Д.Л. Подобед // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого*. – 2019. – № 3. – С. 45–51. – EDN: QCAOWJ.
26. Богданова, В.В. Оптимизация огнезащитно-огнетушащих свойств состава для предотвращения и локализации пожаров в природном комплексе методом математического планирования эксперимента / В.В. Богданова, О.И. Кобец, А.А. Людко, В.П. Кирлица // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2012. – № 1 (15). – С. 32–39. – EDN: SMZWGB.
27. Ольшанский, В.И. Оптимизация состава полимерной композиции и параметров технологического процесса для термогерметизации специальной защитной одежды пожарных / В.И. Ольшанский, В.П. Довыденкова, А.Ф. Худолеев, Н.М. Дмитракович // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. – 2017. – № 2. – С. 116–125. – EDN: YUGXID.
28. Богданова, В.В. Оптимизация огнестойких и термоизолирующих свойств вспениваемых композитов с привлечением математического планирования эксперимента / В.В. Богданова, О.И. Кобец, А.С. Платонов, А.Б. Перевозникова // *Горение и взрыв*. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 62–72. – DOI: 10.30826/CE23160306. – EDN: XKWFRE.
29. Богданова, В.В. Зависимость огне-термозащитных свойств стирол-акрилового термовспениваемого композиционного материала от соотношения основных компонентов / В.В. Богданова, О.И. Кобец, А.С. Платонов [и др.] // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. – 2025. – Т. 61, № 4. – С. 271–285. – DOI: 10.29235/1561-8331-2025-61-4-271-285.
30. Халафян, А.А. *Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA: учеб. пособие* / А. А. Халафян. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 384 с.
31. Кирьянов, Д.В. *Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0* / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

Многофакторная модель оптимизации состава комплексного замедлителя горения для полиамида-6

Multifactor model for optimizing the composition of a complex flame retardant for polyamide-6

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

Криваль Денис Викторович

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра химической, биологической, радиационной и ядерной защиты, преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: den.kryval@mail.ru
SPIN-код: 5548-5105

Denis V. Krival'

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, Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: den.kryval@mail.ru
ORCID: 0009-0006-2389-9276

Дечко Михаил Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Иностранное унитарное научно-производственное предприятие «САМСОЛЮШНС», инженер
Адрес: ул. Филимонова, 15, 220037, г. Минск, Беларусь
Email: mdechko@rambler.ru

Mikhail M. Dechko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Foreign Unitary Scientific and Production Enterprise «SAMSOLUTIONS», Engineer
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: mdechko@rambler.ru

Дьячкова Лариса Николаевна

доктор технических наук, профессор
Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа», лаборатория сверхтвердых и износостойких материалов, главный научный сотрудник
Адрес: ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь
Email: dyachkova@tut.by

Larisa N. Dyachkova

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
State Scientific Institution «Powder Metallurgy Institute», Laboratory of Superhard and Wear-Resistant Materials, Chief Researcher
Address: Platonova str., 41, 220005, Minsk, Belarus
Email: dyachkova@tut.by
ORCID: 0000-0003-4006-8678

MULTIFACTOR MODEL FOR OPTIMIZING THE COMPOSITION OF A COMPLEX FLAME RETARDANT FOR POLYAMIDE-6

Reva O.V., Krival' D.V., Dechko M.M., D'yachkova L.N.

Purpose. Development of an adequate mathematical model of the composition of a complex flame retardant for polyamide-6 with a given reduction limit and its application to determine the optimal characteristics of the flame retardant composition (ensuring fire resistance of the resulting composite material of category PV-0 and a reduction in the main physical and mechanical characteristics by no more than 8–10 % compared to the original polyamide).

Methods. Theoretical methods of statistical analysis of the experimental results were used to obtain a regression model and test its statistical significance and adequacy as well the method of cross-sections of the discriminant function in the plane of the most important factors identified by regression analysis. Statistica (TIBCO Software Inc.) and PTC Mathcad Prime (PTC Inc.) were used for calculations.

Findings. An experimental study and statistical analysis of the obtained data were conducted. Using regression and discriminant analysis methods, a multi-level mathematical model was developed. This model describes the dependence of the fire resistance parameters and mechanical properties of a fire-resistant polymer composite on the total concentration of a complex flame retardant in the polyamide matrix and the relative content of its five components. The coefficients in the regression equation were determined. A comprehensive mathematical model was developed that allows for the identification of the optimal composition of a multi-component flame retardant, taking into account the priority values of the fire-resistant polymer composite's performance parameters.

Application field of research. The developed mathematical model allows us to determine the optimal composition of a complex flame retardant for heat-proof polymers and its concentration in a polymer composite in accordance with the requirements for its most important operational parameters: fire resistance of category PV-0 with a minimal reduction in physical and mechanical properties.

Keywords: theoretical modeling, regression analysis, discriminant analysis, non-toxic multicomponent flame retardants, fire-resistant polyamide composites.

(The date of submitting: January 14, 2026)

REFERENCES

1. Green J. An overview of the fire-retardant chemicals industry, past-present-future. *Fire Materials*, 1995. Vol. 19, No. 5. Pp. 197–204.
2. Kodolov V.I. Zamedliteli goreniiya polimernykh materialov [Combustion inhibitors for polymer materials]. Moscow: Khimiya, 1980. 274 p. (rus)
3. Morgan A.B., Gilman J.W. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions. *Fire Materials*, 2013. Vol. 37, No. 4. Pp. 259–279. DOI: 10.1002/fam.2128.
4. Smayls S.K. Ognезashchitnye dobavki dlya polimernykh materialov: rynek, problemy, puti resheniya [Fire protective additives for polymeric materials: market, problems, and solutions]. *Polymer Materials. Products, Equipment, Technology*, 2018. No. 11. Pp. 50–58. (rus)
5. Timberleyk L.D., Khanson M.V., Narayan S., Filding U.R. Fosforsoderzhashchie antipireny [Phosphorus-containing flame retardants]: patent RU 2535687 C2. Published December 20, 2014. Applicant: Chemtura Corporation (US). (rus). URL: <https://patenton.ru/patent/RU2535687C2> (accessed: January 9, 2026).
6. Lomakin S.M., Zaikov G.E., Mikitaev A.K., Kochnev A.M., Stoyanov O.V., Shkodich V.F., Naumov S.V. Zamedliteli goreniiya dlya polimerov [Combustion retardants for polymers]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012. Vol. 15, No. 3. Pp. 71–86. (rus). EDN: LXNTRB.
7. Kudashev S.V., Shapovalov V.M., Valenkov A.M. Ftorsoderzhashchaya poliamidnaya kompozitsiya s ponizhennoy goryuchest'yu [Fluorinated polyamide composition with reduced flammability]: patent RU 2679237 C1. Published February 6, 2019. Applicant: Volgograd State Technical University. (rus). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2679237C1/ru> (accessed: January 9, 2026).
8. Leonov D.V. Razrabotka poliamida 6 funktsional'nogo naznacheniya, modifitsirovannogo okislennym grafitom [Development of functional polyamide 6 modified with oxidized graphite]. PhD tech. sci. diss.: 05.17.06. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov, 2018. 163 p. (rus)
9. Buravov B.A. Sintez i svoystva polimerizatsionnosposobnykh fosforsoderzhashchikh oligomerov so speyserom v strukture [Synthesis and properties of polymerizable phosphorus-containing oligomers with

- a spacer in the structure]. PhD tech. sci. diss.: 02.00.06. Volgograd State Technical University. Volgograd, 2020. 161 p. (rus)
10. Kostosuchenko M.A., Reviako M.M. Vliyanie triazinovogo i neorganicheskogo fosfornogo ingibitorov goreniya na ekspluatatsionnye svoystva i stoykost' k goreniyu steklonapolnennogo poliamida 6 [Triazine and inorganic phosphorous flame-retardants influence on performance characteristics and compatibility of glass fiber reinforced polyamide 6]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical Series*, 2013. No. 2. Pp. 21–24. (rus). EDN: VHRDLZ.
 11. Bogdanova V.V. Ognegasyashchiy effekt zamedliteley goreniya v sinteticheskikh polimerakh i prirodnykh goryuchikh materialakh [Fire protective effect of flame retardants in synthetic polymers and natural combustible materials]. *Khimicheskie problemy sozdaniya novykh materialov i tekhnologiy* [Chemical problems of creating new materials and technologies]: collection of articles in 2 issues. Minsk: Belarusian State University, 2003. Iss. 2. Pp. 344–375. (rus). EDN: XMIFAD.
 12. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Fiziko-khimiya vspenivayushchikhsya ognenezashchitnykh pokrytiy na osnove polifosfata ammoniya (obzor literatury) [Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate (review of the literature)]. *Fire and Explosion Safety*, 2010. Vol. 19, No. 8. Pp. 11–58. (rus). EDN: MUVTGB.
 13. *Fire retardancy of polymeric materials*. Ed. by A.F. Grand, C.A. Wilkie. New York; Basel: Marcel Dekker, 2000. XIV, 572 p.
 14. *Fire retardant materials*. Ed. by A.R. Horrocks, D. Price. – CRC Press, Woodhead, 2001. – 444 p.
 15. Bogdanova V.V. Transformations of antimony-halogen- and nitrogen-phosphorus-based flame retardants in polyolefins and their performance. *Polymer Science, Series B*, 2001. Vol. 43, No. 3-4. Pp. 105–108. EDN: XJRRAX.
 16. Pesetsky S.S., Yurkovski B., Davydov A.A. Poliamidnye nanokompozity ponizhennoy goryuchesti [Low-flammability polyamide nanocomposites]. *Proc. of XXIII Intern. scientific-technical conf. «Khimicheskie reaktivy, reagenty i protsessy malotonnazhnoy khimii», Minsk, October 27–29, 2010*. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Chemistry of New Materials; ed. by V.E. Agabekov [et al.]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2011. Pp. 184–194. (rus)
 17. 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. DOI: 10.1134/S1070427214100012. EDN: UVBEXF.
 18. Berlin A.A., Wolfson S.A., Oshmyan V.G., Enikolopov N.S. *Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov* [Principles of creating composite polymer materials]. Moscow: Khimiya, 1990. 238 p. (rus)
 19. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy: prochnost' i tekhnologiya* [Polymer composite materials: strength and technology]. Dolgoprudny: Intellect, 2010. 347 p. (rus)
 20. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Buraya O.N. Mekhanizm ognenezaderzhivayushchego deystviya azoti i fosforsoderzhashchikh antipirenov v polimerakh razlichnykh klassov [The mechanism of the nitrogen- and phosphorus-containing fire retardants action in polymers of various classes]. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2023. No. 1. Pp. 3–19. (rus). DOI: 10.33581/2520-257X-2023-1-3-19. EDN: GCPLNJ.
 21. Bogdanova V.V., Arestovich D.N., Kirlitsa V.P. Issledovanie osnovnykh retsepturnykh faktorov, okazyvayushchikh dominiruyushchee vliyanie na termoizoliruyushchuyu sposobnost' i atmosferostoykost' ognenezashchitnykh pokrytiy [Research of main recipe factors providing a dominant impact on the thermal insulating capacity and atmospheric resistance of fire protective coatings]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical Series*, 2017. No. 4. Pp. 24–31. (rus). EDN: YOOTIV.
 22. Chumachenko S.N., Zhartovskiy S.V., Titenko A.N. Metodika sozdaniya matematicheskoy modeli energeticheskoy sostavlyayushchey khimiko-fizicheskikh protsessov, kotorye proiskhodyat v drevesine pri ee nagrevanii do nachala fazy plamennogo goreniya [Methods of creating a mathematical model of an energy component of chemical and physical processes that occur in wood when it is heated prior to the flaming phase]. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*, 2016. Vol. 44, No. 4. Pp. 131–37. (rus). DOI: 10.12845/bitp.44.4.2016.10. EDN: YMDAQJ.
 23. Ilyushina S.V., Fazullina R. N., Minyazova A. N., Zamalieva I. R. Metod trekhfaktornogo planirovaniya sostava vspuchivayushchegosya antipirena [The method of three-factor planning of the composition of an intumescent flame retardant]. *Herald of Technological University*, 2015. Vol. 18, No. 17. Pp. 144–146. (rus). EDN: UOSQND.

24. Leonovich A.A., Glazunova M.G. Prostoy metod sravnitel'noy otsenki effektivnosti antipirenov [A simple method for comparative assessment of the effectiveness of flame retardants]. *Proc. of XXIV All-Russian scientific-practical conf. «Drevesnye plity i fanera: teoriya i praktika»*, St. Petersburg, March 17–18, 2021. Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov. St. Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2021. Pp. 47–55. (rus). EDN: ROBZZV.
25. Bobrysheva S.N., Buyakevich L.I., Podobed D.L. Primenenie metoda dispersionnogo analiza odnofaktornoy matematicheskoy modeli dlya optimizatsii sostava polimerov s ponizhennoy goryuchest'yu [Application of the method of dispersion analysis of a single-factor mathematical model to optimize the composition of polymers with reduced flammability]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*, 2019. No. 3. Pp. 45–51. (rus). EDN: QCAOWJ
26. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A., Kirlitsa V.P. Optimizatsiya ognезashchitno-ognетushashchikh svoystv sostava dlya predotvrashcheniya i lokalizatsii pozharov v prirodnom komplekse metodom matematicheskogo planirovaniya eksperimenta [Optimization of fire-protective and fire-extinguishing properties of a composition for preventing and localizing fires in a natural complex by the method of mathematical experimental planning]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2012. No. 1 (15). Pp. 32–39. (rus). EDN: SMZWGB.
27. Olshansky V.I., Dovydenkova V.P., Hudoleev A.F., Dmitrakovich N.M. Optimizatsiya sostava polimernoy kompozitsii i parametrov tekhnologicheskogo protsessa dlya termogermetizatsii spetsial'noy zashchitnoy odezhdy pozharnykh [Optimization of a mixture of polymeric composition and parameters of technological process for thermo-sealing of special protective clothes for fireman]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical Series*, 2017. No. 2. Pp. 116–125. (rus). EDN: YUGXID.
28. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Platonov A.S., Perevoznikova A.B. Optimizatsiya ognestoykikh i termoizoliruyushchikh svoystv vspenivaemykh kompozitov s privlecheniem matematicheskogo planirovaniya eksperimenta [Optimization of fire-resistant and fire-thermal protective properties of intumescent composites using mathematical experimental planning]. *Combustion and Explosion*, 2023. Vol. 16, No. 3. Pp. 62–72. (rus). DOI: 10.30826/CE23160306. EDN: XKWFRE.
29. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Platonov A.S., Perevoznikova A.B., Buraya O.N. Zavisimost' ognetermozashchitnykh svoystv stirol-akrilovogo termovspeniva-emogo kompozitsionnogo materiala ot sootnosheniya osnovnykh komponentov [Dependence of fire-heat protective properties of styrene-acrylic intumescent composite material on the ratio of main components] *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2025. Vol. 61. No. 4. Pp. 271–285. (rus). DOI: 10.29235/1561-8331-2025-61-4-271-285.
30. Khalafyan A.A. *Promyshlennaya statistika: kontrol' kachestva, analiz protsessov, planirovanie eksperimentov v pakete STATISTICA* [Industrial statistics: quality control, process analysis, design of experiments in the STATISTICA package]; tutorial. Moscow: LIBROKOM, 2013. 384 p. (rus)
31. Kiryanov D.V. *Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2012. 432 p. (rus)

Copyright © 2026 Reva O.V., Krival' D.V., Dechko M.M., D'yachkova L.N.

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

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ПЕНОЙ ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ КАЧЕСТВА ТУШЕНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ

Камлюк А.Н.

Цель. Разработать комплексную методику оценки эффективности тушения пожаров воздушно-механической пеной низкой кратности и провести натурные испытания устройств для ее формирования. Оценить экономическую эффективность применения устройств для формирования воздушно-механической пены низкой кратности.

Методы. Оценка эффективности тушения пеной, формируемой различными устройствами, выполнялась экспериментальным путем, а обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием метода оценивания и выражения неопределенности измерений.

Результаты. Разработана комплексная методика оценки эффективности тушения пожаров воздушно-механической пеной низкой кратности. Для определения эффективности тушения проведены сравнительные испытания: для генераторов пены – стволы СВП и СВП-2, водопенный насадок НВП-11/0,6 У1 для пожарного ствола СРК-50 и воздушно-пенный насадок для пожарного ствола СПРУК 50/0,7; для установок генерирования компрессионной пены – пожарные стволы СПРУ 50/0,7 и Elkhart Brass ST-185A с подачей компрессионной пены; для автоматических установок пожаротушения – оросители V2, ТУ 3251, ДПУ-15, ДВН-11. Оценка экономической эффективности свидетельствует о целесообразности применения воздушно-механической пены низкой кратности при тушении пожаров и позволяет выбрать оптимальное средство для ликвидации ЧС как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения экономии денежных средств.

Область применения исследований. Разработанная методика оценки эффективности тушения пожаров воздушно-механической пеной низкой кратности может быть применена при разработке и внесении изменений в отечественные ТНПА в данной области, а также для исследования устройств (в том числе вновь разработанных) для формирования воздушно-механической пены в условиях, приближенных к реальному пожару. Кроме того, с использованием комплексной методики можно выбрать наиболее эффективное средство для ликвидации ЧС с точки зрения безопасности и экономии.

Ключевые слова: генератор пены, ороситель, установка генерирования компрессионной пены, кратность пены, эффективность тушения пеной, время тушения, расход огнетушащего вещества, экономическая эффективность.

(Поступила в редакцию 2 октября 2025 г.)

Введение

Воздушно-механические пены представляют собой дисперсные системы, состоящие из пузырьков воздуха, окруженных пленками жидкости. Они широко используются при тушении пожаров класса А (твердые вещества) и класса В (жидкие вещества). Различают воздушно-механические пены низкой (до 20), средней (20–200) и высокой (более 200) кратности [1]. Под кратностью пены K понимается величина, равная отношению объема пены к объему раствора пенообразователя, содержащегося в ней [2]. Пены низкой кратности получили более широкое распространение по сравнению с пенами средней и высокой кратности [2–4]. К достоинствам пен низкой кратности следует отнести:

- сокращение расхода воды на пожаротушение (наличие воздуха в составе пены увеличивает общий объем огнетушащего вещества (ОТВ));
- возможность тушения пожаров на больших площадях (пена растекается по поверхности горючего материала);
- повышенная в сравнении с водой смачивающая способность (наличие в составе пенообразователя (ПО));
- увеличенная по сравнению с пенами средней и высокой кратности дальность полета пенной струи;
- возможность тушения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей.

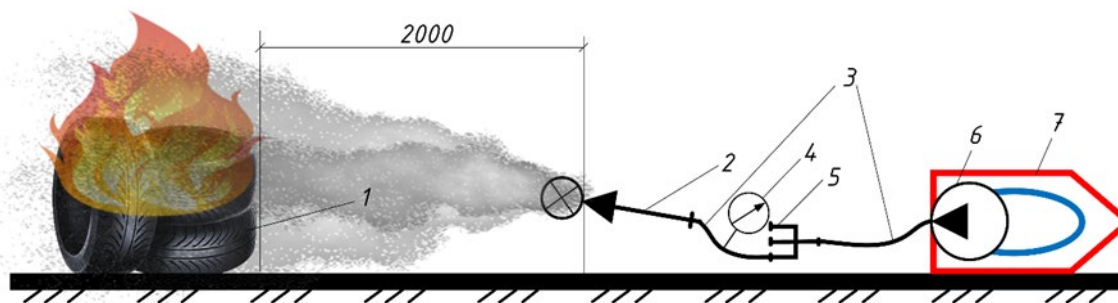
Для получения пены низкой кратности (далее – пена) применяются следующие устройства для ее формирования: генераторы пены [3–8], установки генерирования компрессионной пены (УГКП) [9–13], пенные и водопенные розеточные оросители автоматических установок пожаротушения (АУП) [14–16]. Несмотря на то что их тактико-технические характеристики изучены достаточно хорошо, единые подходы к определению эффективности тушения пожаров в комплексе до сих пор не рассматривались. В данной статье представлены обобщенные методы применения пен для нужд пожаротушения, включающие определение показателя эффективности тушения для различных устройств генерирования воздушно-механической пены, которые легли в основу комплексной методики.

Основная часть

Описание экспериментальных установок и общих положений и требований **методики проведения исследований**. Основная идея разработки комплексной методики состоит в том, что все параметры испытаний (величина модельного очага пожара, расположение в пространстве устройств для формирования пены, применяемое горючее вещество (топливо), вид и тип ПО остаются постоянными, а изменяется только устройство для формирования пены. Каждое устройство при прочих равных условиях способно генерировать пену с отличающимися характеристиками, такими как кратность, дисперсность и устойчивость. Как известно [2; 14], кратность получаемой пены имеет важное значение во время ликвидации чрезвычайных ситуаций. Данный подход позволяет исключить влияние факторов, не являющихся целью исследований и позволяет сосредоточиться только на эксплуатационных характеристиках самих устройств.

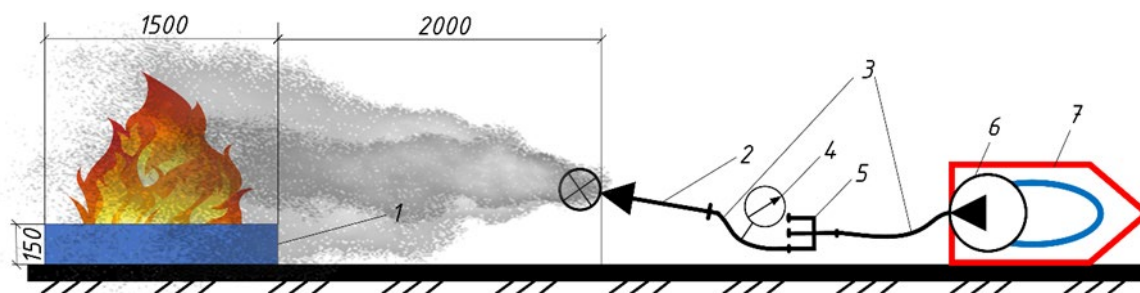
Для определения огнетушащей эффективности устройств для формирования пены необходимо проводить сравнительные исследования эффективности тушения модельного очага пожара классов А или В. Стандартный модельный очаг пожара А – это деревянный штабель, размеры и конструкция которого определены стандартом, а модельный очаг В – противень с горючей жидкостью. В качестве модельного очага пожара класса А может использоваться штабель из покрышек для имитации горения твердых горючих материалов, таких как древесина, бумага и текстиль. В связи с тем что предлагаемая комплексная методика оценки эффективности тушения пожаров предназначена для сравнения устройств для формирования пены между собой и не применяется для их сертификации, в качестве модельного очага пожара класса А может быть принят штабель из покрышек, а модельного очага пожара класса В – противень с горючей жидкостью. Причем с учетом специфики применения устройств для генераторов пены (как самых распространенных устройств) рекомендуется проводить исследования с модельными очагами пожара обоих классов на открытой местности, для УГКП – только класса А на открытой местности, а для АУП – только класса В в крытом строении. В качестве ПО возможно использовать синтетические углеводородные пенообразователи типа S, пенообразователи пожарные фторсинтетические пленкообразующие типа AFFF и пенообразователи пожарные типа WA (смачиватели) с концентрацией в растворе, рекомендуемой производителем, и близкими физико-техническими характеристиками.

Для проведения экспериментальных исследований генераторов пены следует применять схемы, которые представлены на рисунках 1а и 1б, а для УГКП – только на рисунке 1б.



а – тушение модельного очага пожара класса А

Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки для определения эффективности тушения пеной, формируемой генератором пены (а и б) и УГКП (б)

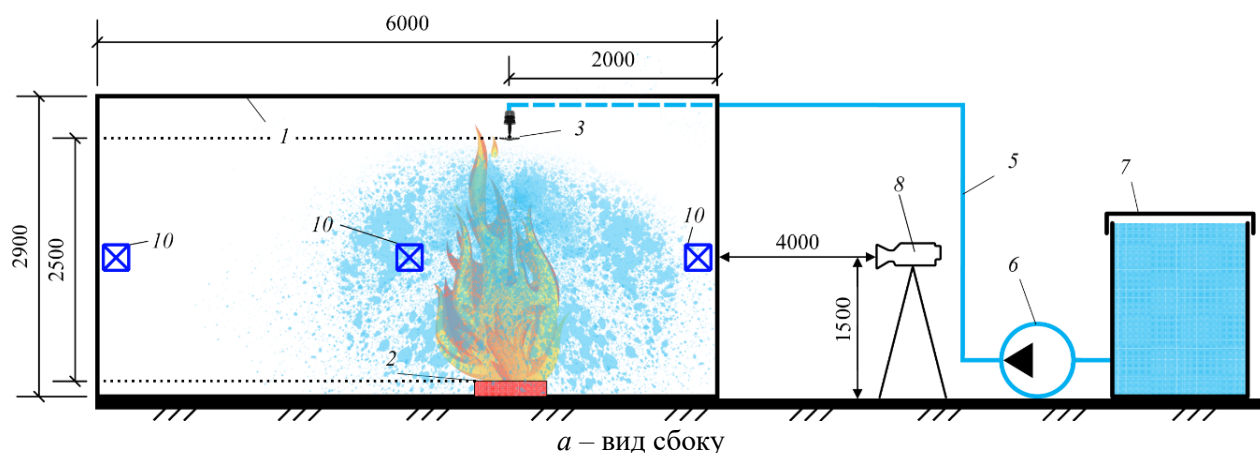


б – тушение модельного очага пожара класса В

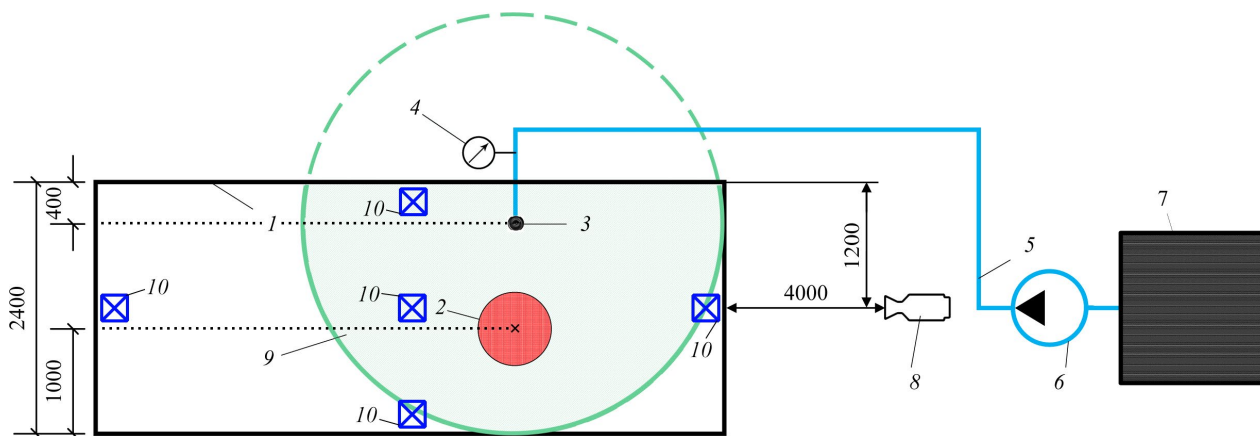
1 – модельный очаг пожара; 2 – генератор пены; 3 – рукавная линия; 4 – манометр;
5 – разветвление трехходовое РТ-80; 6 – пожарный насос; 7 – пожарная автоцистерна

Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки для определения эффективности тушения пеной, формируемой генератором пены (а и б) и УГКП (б)

На рисунке 2 представлена схема для определения эффективности тушения пеной, генерируемой АУП.



а – вид сбоку



б – вид сверху

1 – испытательное помещение; 2 – модельный очаг пожара; 3 – ороситель; 4 – манометр;
5 – трубопровод; 6 – насос; 7 – емкость с раствором ПО; 8 – видеокамера;

9 – защищаемая оросителем площадь; 10 – место измерения параметров окружающей среды

Рисунок 2. – Схема экспериментальной установки для определения эффективности тушения пеной, генерируемой АУП

На рисунках 1 и 2 все размеры указаны в миллиметрах. Допускается отклонение указанных размеров, но не более чем на 10 %.

В качестве модельного очага пожара класса А необходимо использовать штабель, состоящий из автомобильных покрышек 265/70R17 (внешний диаметр $0,803 \pm 0,01$ м, ширина $0,265 \pm 0,01$ м, масса $20,5 \pm 0,1$ кг) в количестве 4 шт., при этом общая масса горючего материала должна составлять около $82,0 \pm 0,5$ кг. В центре штабеля располагают одну покрышку и дополнительно к ней приставляют по периметру еще 3 шт. (рис. 3).

Возможно и иное расположение покрышек или использование покрышек с отличающимися геометрическими параметрами, но важно, чтобы общая масса горючего материала была $82,0 \pm 0,5$ кг.

В качестве модельного очага пожара класса В можно использовать прямоугольный противень, изготовленный из стали марки Ст. 3 с номинальными размерами $1500 \times 1000 \pm 10$ мм, высотой борта 150 ± 1 мм и толщиной стенок $2,0 \pm 0,2$ мм. В данный противень с помощью мерной емкости требуется залить $150,0 \pm 0,1$ л воды и сверху $9,0 \pm 0,1$ л топлива. В качестве топлива следует применять смесь углеводородов с температурой кипения в пределах $80-120$ °С. Для определения эффективности тушения пеной, генерируемой АУП, допускается использовать противень круглый, изготовленный из стали марки Ст. 3 с номинальным диаметром 700 ± 10 мм, высотой борта 145 ± 1 мм и толщиной стенок $2,0 \pm 0,2$ мм. Не позднее 300 ± 15 с после наполнения противня топливо в нем поджигается. Затем необходимо выдерживать время свободного горения топлива $t_{св.г}$: для модельного очага пожара класса А – $t_{св.г} = 120 \pm 1$ с; для модельного очага пожара класса В – $t_{св.г} = 100 \pm 1$ с. Продолжительность тушения ограничивается временем $t_{max} = 600 \pm 1$ с для модельного очага пожара класса А и $t_{max} = 240 \pm 1$ с для модельного очага пожара класса В, значение которых соответствует моменту самопроизвольного затухания модельного очага пожара. Если тушение модельного очага пожара не наступало за данный промежуток времени, то испытание прекращается.

Далее путем наблюдения определяется время повторного воспламенения модельного очага пожара, результат фиксируется. Оставшееся после испытания топливо вместе с водой сливается в отдельную емкость, а сгоревшие шины удаляются. Несгоревшее топливо и шины при дальнейшем проведении испытаний не применяются.

При выполнении исследований рекомендуется следующее экспериментальное оборудование в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1. – Экспериментальное оборудование

Наименование оборудования	Характеристика
Пожарный насос НЦПН 40/100, расположенный на автоцистерне	максимальное давление – 1500 кПа; номинальная производительность – 40 л/с
Рукав пожарный напорный	длина – 20 ± 1 м; внутренний диаметр – 77 мм в количестве 1 шт. (для прокладки рукавной линии до разветвления); длина – 20 ± 1 м; внутренний диаметр – 66 мм в количестве до 1 шт. (для подключения СВП); длина – 20 ± 1 м; внутренний диаметр – 51 мм в количестве 1 шт. (для подключения НВП-11/0,6 У1 и ВПН СПРУК 50/0,7)
Разветвление трехходовое РТ-80	условный проход выходных патрубков: центрального – 77 мм; боковых – 51 мм
Автомобильные покрышки для создания модельного очага пожара класса А	внешний диаметр – $0,803 \pm 0,01$ м; ширина – $0,265 \pm 0,01$ м; масса – $20,5 \pm 0,1$ кг
Противень для создания модельного очага пожара класса В	для генераторов пены: длина – $1,5 \pm 0,01$ м; ширина – $1 \pm 0,01$ м; высота – $0,15 \pm 0,001$ м; для АУП: диаметр – $0,7 \pm 0,01$ м; высота – $0,145 \pm 0,001$ м

Помимо экспериментального оборудования (табл. 1) для исследования необходимо использовать средства измерения, приведенные в таблице 2.

Требуется проводить не менее трех испытаний для каждого устройства для формирования пены при тушении модельных очагов пожара классов А и В. За результат испытаний принимается среднее арифметическое результатов успешных определений времени тушения. Расхождение между результатами испытаний с доверительной вероятностью 0,95 допускается не более 20 % от среднего значения.

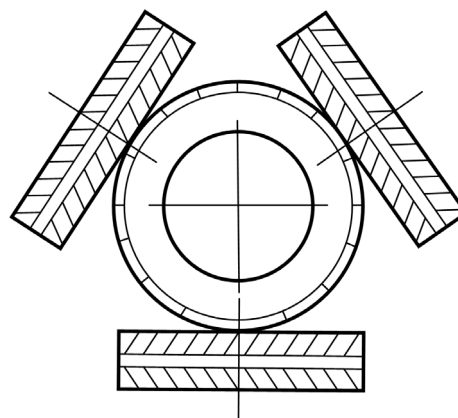


Рисунок 3. – Схема расположения автомобильных покрышек в условном очаге пожара (вид сверху)

Таблица 2. – Средства измерений

Наименование	Диапазон измерений	Цена деления	Погрешность
Термогигрометр Testo 605-H1	0–50 °С; 5–95 %	0,1 °С; 0,1 %	± 0,6 °С; ± 3,0 %
Анемометр Testo 405-V1	0–10 м/с	0,1 м/с	± (0,31 + 5 % от изм. знач.) м/с
Мерная емкость	0–2 л	0,005 л	± 0,003 л
Секундомер Electronika RI-01	0 ч 00 мин 00 с – 9 ч 59 мин 59,99 с	0,01 с	± (9,6·10 ⁻⁶ · <i>T</i> _{изм. знач.} + 0,01 с)
Манометр МВПЗ-УМ-1,5-М20×1,5	0–1000 кПа	5 кПа	± 0,15 % (± 1,5 кПа)
Дальномер лазерный GLM 80	0,05–80 м; 0–360°	1 мм; 0,05°	± 0,01 м; ± 0,2°
Весы электронные серии ВВА211-5ВА30 (Mettler-Toledo)	0,2–30 кг	5 г	от 0,2 до 5 кг – ± 5 г; св. 5 до 20 кг – ± 10 г; св. 20 до 30 кг – ± 15 г

Примечание. Средства измерений должны быть внесены в государственный реестр средств измерений Республики Беларусь и на период проведения исследований иметь действующие аттестаты, свидетельства о поверке и/или калибровке. Условия проведения исследований должны соответствовать условиям эксплуатации измерительного оборудования.

Испытания проводятся при следующих параметрах окружающей среды: температура 0–30 °С, влажность 60,0–80,0 %, скорость воздушного потока менее 3 м/с, атмосферное давление 740 ± 50 мм рт. ст. Процесс тушения модельного очага пожара фиксируется с помощью видеокамеры.

После проведения натуральных испытаний определяется поверхностная интенсивность (количество огнетушащего вещества, подаваемое в единицу времени на единицу площади) подачи раствора ПО $I_{\text{ПО}}$ (л/(с·м²)):

– для генераторов пены и УГКП с помощью выражения:

$$I_{\text{ПО}} = Q/S_3, \quad (1)$$

– для АУП с помощью выражения:

$$I_{\text{ПО}} = Q_{\text{АУП}} j_p / S_3, \quad (2)$$

где Q – расход раствора ПО (принимался согласно паспортам завода-изготовителя), л/мин;

S_3 – площадь модельного очага пожара, м² (для модельного очага пожара класса *A* площадь $S_3 = 2$ м²; класса *B* – $S_3 = 1,5$ м² при испытании генераторов пены и УГКП, $S_3 = 0,49$ м² при испытании АУП);

j_p – коэффициент, показывающий долю разбрызгиваемого оросителем ОТВ, попадающую в пределы защищаемой им площади, равной $S = 12$ м².

Расход раствора ПО для АУП $Q_{\text{АУП}}$ (л/мин) в (2) рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{АУП}} = AK_p \sqrt{P}, \quad (3)$$

где $A = 1/60$ – переводной коэффициент, с·мин⁻¹;

K_p – коэффициент производительности оросителя (указывается в технической документации к оросителю), л/(с·МПа^{1/2});

P – рабочее давление оросителя, МПа.

Для количественной оценки огнетушащей эффективности пены, формируемой генераторами пены, рассчитывается показатель эффективности тушения E_t [8; 17–19]. Он объединяет два главных параметра тушения – удельный расход раствора ПО $V_{\text{ПО}}$ (л/м²) и время тушения $t_{\text{ТУШ}}$ (с). Показатель E_t позволяет оценить, какую площадь можно потушить 1 л раствора ПО за единицу времени. Чем выше абсолютное значение показателя E_t , тем выше огнетушащий эффект. Показатель E_t (м²/(л·мин)) рассчитывается по следующей формуле:

$$E_t = (V_{\text{ПО}} \cdot t_{\text{ТУШ}})^{-1}. \quad (4)$$

¹ Государственный реестр средств измерений (стандартных образцов) Республики Беларусь // Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений. – URL: [https://oei.by/grsi?GrsiSearch\[grsi_status\]=1](https://oei.by/grsi?GrsiSearch[grsi_status]=1) (дата обращения: 19.06.2025).

Так как $V_{ПО} = I_{ПО} \cdot t_{туш}$, то показатель эффективности тушения можно записать в следующем виде:

$$E_t = (I_{ПО} \cdot t_{туш}^2)^{-1}. \tag{5}$$










Для сравнительной оценки эффективности введен коэффициент качества тушения $K_{КТ}$ [20]:

$$K_{КТ} = E_t / E_{t0}, \tag{6}$$

где E_{t0} – эталонный показатель эффективности тушения (принимается равным показателю эффективности тушения наиболее распространенного в пожаротушении воздушно-пенного ствола СВП).

Для апробации разработанной комплексной методики оценки эффективности тушения пожаров проведены исследования с распространенными в Республике Беларусь установками и устройствами, технические характеристики которых представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Технические характеристики исследуемых устройств и установок

Автоматические установки пожаротушения. По трубопроводу подается раствор пенообразователя				
Модель	ТУ 3251	Ороситель V2	ДПУ-15	ДВН-11
Внешний вид				
Коэффициент производительности K_p , л/(с·МПа ^{1/2})	4,2	3,7	7,4	4,4
Кратность генерируемой пены, не менее	5	10	8	5
Генераторы пены. По рукавной линии подается раствор пенообразователя				
Модель	СВП	НВП-11/0,6 У1	ВПН СПРУК 50/0,7	СВП-2
Внешний вид				
Рабочее давление, кПа	600	400	700	600
Производительность по пене, л/с	48,0	24,4	46,0	32,0
Расход рабочего раствора ПО при рабочем давлении, л/с	6,0	2,1	2,3	4,0
Кратность генерируемой пены, максимальная	8	11	20	8
Установка генерирования компрессионной пены. По рукавной линии подается пена				
Внешний вид УГКП (на примере Waterous 80-40-E)				

Продолжение таблицы 3

Модель	СПРУ 50/0,7	Elkhart Brass ST-185A
Внешний вид		
Рабочее давление, кПа	700	700
Производительность по пене, л/с	3,3	3,5
Кратность генерируемой пены, диапазон (т.к. кратность регулируется)	4–20	4–20

Порядок проведения натуральных испытаний оросителей АУП, генераторов пены и УГКП.

АУП. Испытуемый ороситель 3 (рис. 2) крепится розеткой вниз на прямолинейном участке трубопровода 5 на высоте $2,45 \pm 0,01$ м. Данная высота измеряется от верхнего среза борта противня, примененного в качестве модельного очага пожара 2, до розетки оросителя 3. Сам ороситель монтируется таким образом, чтобы плоскость его дужек была перпендикулярна боковым стенам испытательного помещения длиной $6,0 \pm 0,1$ м.

Для измерения давления жидкости перед оросителем на трубопроводе 5 монтируется манометр 4 на расстоянии 450 ± 10 мм от оросителя 3. Данное расстояние выбрано для того, чтобы расположить манометр за пределами испытательного помещения 1 и исключить огневое воздействие на него. Гидравлические потери на участке трубопровода 5 между оросителем 3 и манометром 4 незначительны, и ими можно пренебречь. При испытаниях давление перед оросителем по показаниям манометра 4 устанавливается на уровне $0,15 \pm 0,01$ МПа.

Модельный очаг пожара устанавливается таким образом, чтобы центр противня находился на расстоянии 1000 ± 10 мм от проекции осевой линии оросителя на пол испытательного помещения 1. Не позднее 300 ± 15 с после наполнения противня топливом в нем поджигалось. Далее запускается насос 6 и по трубопроводу 5 рабочий раствор ПО подается через ороситель 3 на тушение модельного очага пожара 2.

Генераторы пены и УГКП. Испытуемый генератор пены (пожарный ствол УГКП) 2 (рис. 1а и 1б) удерживается в горизонтальном положении на высоте $1,0 \pm 0,2$ м от земли и на расстоянии $2,00 \pm 0,01$ м от модельного очага пожара 1. Данное расстояние измеряется от ближнего края борта противня, крайней покрывки в штабеле, примененных в качестве модельного очага пожара 1, до выходного сечения генератора пены (пожарного ствола УГКП) 2 (рис. 1).

Для измерения давления жидкости во входном сечении генератора пены (пожарного ствола УГКП) между рукавной линией 3 и трехходовым разветвлением 5 монтируется манометр 4. Раствор ПО подводится к генератору пены по рукавной линии 3 от пожарной автоцистерны. Гидравлические потери на участке рукавной линии 3 между генератором пены 2 и манометром 4 незначительны, и ими можно пренебречь. При испытаниях устанавливается рабочее давление каждого генератора пены по показаниям манометра 4. В случае применения УГКП вместо раствора ПО по рукавной линии подается пена, полученная в камере смешения.

Результаты натуральных испытаний. Для определения эффективности тушения проведены сравнительные испытания:

- для АУП – оросители V2, ТУ 3251, ДПУ-15, ДВН-11;
- для генераторов пены – ствол СВП², СВП-2, водопенный насадок НВП-11/0,6 У1 для пожарного ствола СРК-50 [21–26] и воздушно-пенный насадок (ВПН) для пожарного ствола СПРУК 50/0,7 [3–8];

² Стволы СВП, СВПЭ-2, СВПЭ-4, СВПЭ-8: ТТХ, площадь тушения и производительность // FIREMAN.CLUB: Пожарная безопасность: сайт пожарных и спасателей МЧС. – URL: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/stvolysvp-4-svp-8-ttx-iz-chego-sostoit-rasxod-vody-rasxod-penoobrazovatelya-ploshhad-tusheniya-proizvoditelnost/> (дата обращения: 19.06.2025).

– для УГКП – пожарные стволы СПРУ 50/0,7 и Elkhart Brass ST–185A с подачей компрессионной пены.

В таблице 4 представлены результаты натурных испытаний оросителей АУП. Ввиду высокой трудоемкости натурные испытания оросителей проводились в течение нескольких дней. Очередность оросителей для испытаний была установлена случайным способом.

Таблица 4. – Результаты натурных испытаний оросителей АУП (очаг пожара класса В)

Модель	ТУ 3251	Ороситель V2	ДПУ-15	ДВН-11
Коэффициент производительности K_p , л/(с·МПа ^{1/2})	4,2	3,7	7,4	4,4
Время тушения $t_{туш}$ модельного очага пожара, с	Нет тушения	63	69	121
Повторное воспламенение	Не определялось	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Показатель E_i при тушении модельного очага пожара, м ² /(л·мин)·10 ²	Не определялся	19,45	7,81	4,59

Процесс тушения модельного очага пожара оросителями представлен на рисунке 4. Следует заметить, что при проведении испытаний та часть потока, которая направлялась оросителем в стену испытательного помещения (фиксировалось визуально), либо отбивалась от нее, либо просто стекала вниз, но ни в том, ни в другом случае не попадала в модельный очаг пожара и не влияла на результат тушения.

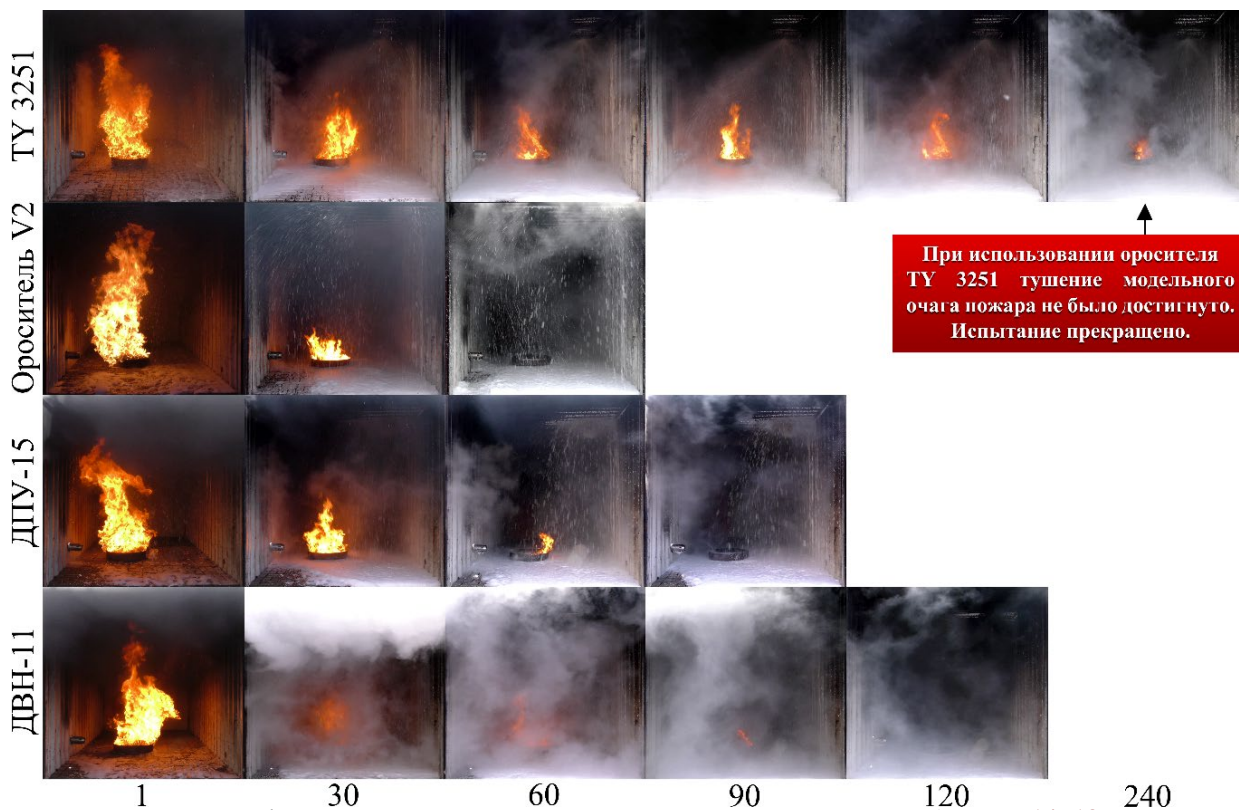


Рисунок 4. – Время тушения очага пожара класса В с помощью АУП, с [14; 18]

Согласно проведенным натурным испытаниям лучший результат (время тушения модельного очага пожара 63 с) показал ороситель V2. При использовании оросителя ДПУ-15 тушение было достигнуто за 69 с, а оросителя ДВН-11 за 121 с, что на 9,5 и 92,1 % соответственно дольше по сравнению с оросителем V2. Худший результат показан оросителем ТУ 3251 – тушение не было достигнуто за время проведения испытаний (240 с). Объясняется это тем, что ТУ 3251 по большей степени разрабатывался для применения с пленкообразующими пенообразователями целевого назначения, для которых высокая кратность генерируемой пены не является определяющим фактором тушения пожара. Основной огнетушащий эффект пены, генерируемой из таких пенообразователей, заключается в формировании плотной пленки на поверхности горючего вещества, которая перекрывает доступ воздуха к нему. Однако пленкообразующие пенообразователи значительно дороже и наносят больший

ущерб окружающей среде по сравнению с пенообразователями общего назначения за счет наличия в них перфторалкилов, которые загрязняют почву и грунтовые воды.

Для пенообразователей общего назначения одним из определяющих факторов успешного тушения пожара является кратность генерируемой из него пены: чем она выше, тем быстрее достигается огнетушащий эффект [18]. Еще одним объяснением, почему модельный очаг пожара не был потушен оросителем ТУ 3251, является распределение ОТВ по защищаемой поверхности. Так, по сравнению с остальными оросителями ТУ 3251 имеет наименьший коэффициент $j_p = 0,5$, т.е. только 50 % ОТВ попадает в пределы защищаемой площади 12 м². Таким образом, основываясь на полученных результатах, можно заключить, что средняя интенсивность орошения защищаемой площади оросителем ТУ 3251 и кратность генерируемой им пены недостаточны для тушения модельного очага пожара в условиях, созданных при проведении натурных испытаний.

Следует отметить, что остальные три оросителя предназначены для работы именно с пенообразователями общего назначения, поэтому при их использовании удалось достичь тушения модельного очага пожара за отведенное в рамках испытаний время. Тем не менее для тушения очага оросителем ДВН-11 понадобилось практически в два раза больше времени по сравнению с тушением оросителем V2 и ДПУ-15. Это можно объяснить тем, что данный ороситель позиционируется производителем как водопенный, т.е. для разбрызгивания как воды, так и пены. Можно предположить, что производитель не ставил за главную цель оптимизировать конструкцию данного оросителя для генерирования пены с кратностью, сопоставимой с пенными оросителями (например, пенным оросителем V2 ($K = 13,6 \pm 0,2$)).

Основываясь на полученных показателях эффективности тушения в таблице 5, можно заключить, что при прочих равных условиях пена, генерируемая оросителем V2, имеет в 2,5 раза большую огнетушащую эффективность по сравнению с оросителем ДПУ-15 и в 4,2 раза по сравнению с ДВН-11. Отсюда можно сделать вывод, что для тушения пожара оросителем V2 необходимо меньшее количество воды и пенообразователя, нежели для тушения оросителями ДПУ-15 либо ДВН-11, при этом огнетушащий эффект достигается быстрее по сравнению с аналогами. При этом следует подчеркнуть, что более быстрое тушение при меньшем расходе ОТВ позволит сократить не только материальный ущерб от пожара и процесса пожаротушения (излишнее количество ОТВ повреждает строительные конструкции, оборудование, материалы и др.), но и экологический ущерб от применения пенообразователей.

В таблице 5 представлены результаты натурных испытаний генераторов пены.

Таблица 5. – Результаты натурных испытаний генераторов пены

Модель	СВП	НВП-11/0,6 У1	ВПН СПРУК 50/0,7
Расход раствора ПО, л/мин	360	123	138
Время тушения $t_{\text{туш}}$ модельного очага пожара, с:			
класса А	12	22	7
класса В	14	8	7
Повторное воспламенение	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Показатель E_t при тушении модельного очага пожара, м ² / (л · мин) · 10 ² :			
класса А	13,89	12,09	106,48
класса В	7,65	68,6	79,86

Согласно проведенным натурным испытаниям лучший результат по тушению модельного очага пожара класса А (время тушения модельного очага пожара 7 с) показал насадок ВПН СПРУК 50/0,7 (рис. 5). При использовании ствола СВП тушение было достигнуто за 12 с, а насадка НВП-11/0,6 У1 – за 22 с, что на 71,4 и 217,3 % соответственно дольше по сравнению с насадком ВПН СПРУК 50/0,7. При тушении модельного очага пожара класса В лучшее время (7 с) снова показал насадок ВПН СПРУК 50/0,7, а генераторы пены СВП и НВП-11/0,6 У1 потушили модельный очаг пожара за 14 и 8 с соответственно, что на 100 и 14,3 % дольше по сравнению с насадком ВПН СПРУК 50/0,7 (рис. 6).



Рисунок 5. – Время тушения модельного очага пожара класса А генераторами пены, с [8]

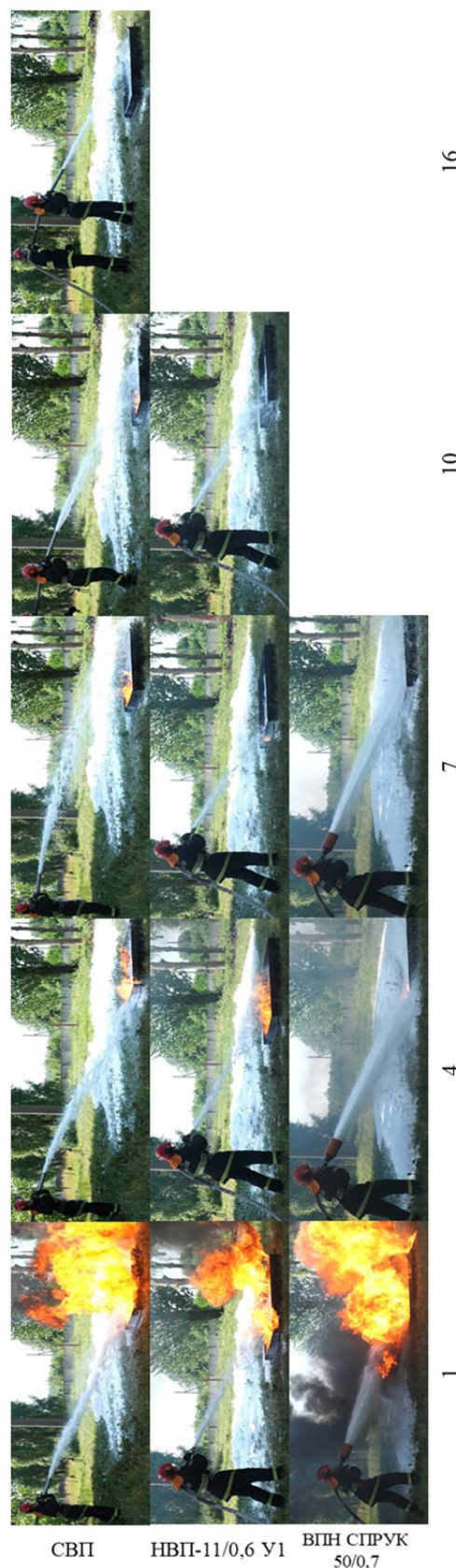


Рисунок 6. – Время тушения модельного очага пожара класса В генераторами пены, с [8]

Для анализа результатов стоит обратить внимание на кратность генерируемой пены. Так, насадок ВПН СПРУК 50/0,7 обладает наиболее высокой кратностью по сравнению с двумя другими испытуемыми генераторами пены (больше, чем у СВП и НВП-11/0,6 У1 на 150 и 66,7 % соответственно) (табл. 3), что объясняет меньшие затраты времени на тушение обоих модельных очагов пожара. Однако насадок НВП-11/0,6 У1 имеет на 50 % большую

кратность по сравнению со стволом СВП, при этом время, затраченное им на тушение модельного очага пожара класса А, на 83,3 % больше. Это можно объяснить, сравнив расходы растворов ПО этих двух генераторов.

Так, у насадка НВП-11/0,6 У1 расход раствора ПО составляет 2,1 л/с (123 л/мин), в то время как у ствола СВП этот показатель равен 6 л/с (360 л/мин), что почти в 3 раза больше. Это указывает на тот факт, что при тушении пожаров класса А огнетушащая эффективность средства тушения в большей степени определяется величиной его расхода ОТВ, а для пожаров класса В – кратностью генерируемой пены. Здесь дополнительно следует рассмотреть механизм тушения пожара пенами низкой кратности [8], который предусматривает два этапа. На первом этапе происходит соприкосновение фронта потока ОТВ с частью факела пламени. В этом случае поток ОТВ взаимодействует только с небольшим (локальным) участком пламени, в результате чего происходит поглощение не только части тепла от факела на этом участке, но и практически охлаждение его до температуры, близкой к температуре кипения воды. Это вызывает прекращение горения непосредственно на фронте движения огнетушащей струи. Такой «локальный» механизм взаимодействия струи ОТВ с пламенем приводит к испарению части струи. На втором этапе процесса тушения происходит «растекание» пены по горячей поверхности слоем определенной толщины. Указанные два этапа имеют разную результативность в зависимости от класса пожара – А или В. Чем выше кратность пены, тем сложнее ей проникнуть в зазоры и попадать в труднодоступные места объектов со сложной конфигурацией. По этой причине эффективность тушения будет определяться не значением кратности пены, а интенсивностью подачи ОТВ в очаг пожара класса А. Подобный механизм не работает при тушении очага пожара класса В, т.к. раствор пенообразователя, имеющий плотность выше плотности горючей жидкости, опускается на дно противня и не оказывает огнетушащего эффекта. В этом случае пена (плотность ее меньше плотности горючего материала) растекается по поверхности и оказывает огнетушащий эффект. На твердой поверхности процесс растекания пены затруднен в принципе, а на поверхности горючей жидкости скорость покрытия ОТВ тем выше, чем выше кратность пены. Необходимо отметить, что механизм тушения пламени горючих жидкостей пеной низкой кратности сводится в основном ко второму этапу, когда определяющим является процесс растекания пены по горячей поверхности и тушение пламени достигается после растекания пены слоем определенной толщины, вплоть до соприкосновения с нагретой стенкой резервуара. Характерной особенностью начала процесса тушения пеной низкой кратности является резкое увеличение объема факела пламени (хорошо видно на рисунке 6), что объясняется наличием эжектируемого дополнительного потока воздуха [8].

Основываясь на полученных показателях эффективности тушения в таблице 5, можно говорить о том, что пена, формируемая насадком ВПН СПРУК 50/0,7, имеет в 7,5 и 10 раз большую огнетушащую эффективность по сравнению со стволом СВП и в 8,8 и 1,2 раза по сравнению с НВП-11/0,6 У1 при тушении модельного очага пожара классов А и В соответственно. Отсюда можно сделать вывод, что для тушения пожара с использованием насадка ВПН СПРУК 50/0,7 необходимо меньшее количество воды и ПО, нежели для тушения стволом СВП либо насадком НВП-11/0,6 У1, при этом огнетушащий эффект достигается быстрее. Также НВП-11/0,6 У1 при тушении модельного очага пожара класса В имеет более высокую (не менее чем в 9 раз) огнетушащую эффективность, чем ствол СВП, а при тушении пожаров класса А в связи с меньшими значениями расхода затрачивает меньше ОТВ (45 л у НВП-11/0,6 У1 против 72 л у СВП). Все это позволит сократить не только материальный ущерб от пожара и процесса пожаротушения (излишнее количество ОТВ повреждает строительные конструкции, оборудование, материалы и др.), но и экологический ущерб от применения ПО.

Результаты натурных испытаний УГКП приведены в таблице 6 и на рисунке 7.

С целью сравнения огнетушащей эффективности УГКП с работой генераторов пены в день проведения экспериментальных исследований для УГКП была подана пена от СВП-2 (по рукавной линии подавался раствор с концентрацией ПО, рекомендованной производителем).

Таблица 6. – Результаты натурных испытаний УГКП (очаг пожара класса А)

Модель	СПРУ 50/0,7	Elkhart Brass ST-185A	СВП-2
Расход раствора ПО, л/мин	199	212	165
Время тушения $t_{\text{туш}}$ модельного очага пожара, с	23	20	55
Повторное воспламенение	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Показатель E_t при тушении модельного очага пожара, $\text{м}^2/(\text{л}\cdot\text{мин})\cdot 10^2$	6,84	8,49	1,44

В результате анализа данных, представленных в таблице 6, установлено, что на тушение условного очага пожара класса А компрессионной пеной потребовалось в 2 раза меньше времени, чем стволом СВП-2. Также пена, формируемая СВП-2, имеет в 4,7 и 5,9 раза меньшую огнетушащую эффективность по сравнению со стволами СПРУ 50/0,7 и Elkhart Brass ST-185A соответственно. Это позволяет говорить о высокой огнетушащей эффективности УГКП.

Особенность УГКП заключается в генерировании пены в камере смешения внутри самой установки, поэтому к очагу пожара по рукавной линии подается не раствор пенообразователя, как для генераторов пены, а непосредственно сама пена. В связи с этим было принято решение уменьшить концентрацию ПО ниже уровня, рекомендуемого производителями для обычных генераторов пены с целью экономии денежных средств и повышения экологичности процесса тушения.

Во время проведения экспериментальных исследований были определены минимально допустимые концентрации содержания ПО в растворе воды и ПО для получения компрессионной пены с применением УГКП: ОПС-0.4 – 0,4 % (рекомендуемое производителем значение – 1 %). Время тушения в таблице 6 показано при подаче ОПС-0.4 в очаг пожара класса А. Приведенные значения показывают, что при превосходящей огнетушащей эффективности УГКП над традиционными технологиями тушения пеной низкой кратности для подачи компрессионной пены требуется в 2,5 меньшее количество ПО, что говорит о снижении себестоимости пожаротушения пеной низкой кратности при использовании УГКП.

Оценка экономической эффективности. В таблице 7 представлен расчет коэффициента качества тушения $K_{КТ}$ модельного очага пожаров для всех исследуемых устройств и установок, представленных в данной работе. Сравнение всех устройств относительно генератора СВП как базового позволяет сделать вывод, что наиболее эффективными являются насадки на пожарные стволы, для которых коэффициент качества тушения $K_{КТ}$ в 9–10 раз выше, чем для СВП. Однако не всегда только по скорости ликвидации модельного очага нужно судить о превосходстве того или иного устройства или установки перед другими. Часто приходится обращать внимание и на экономическую сторону процесса. В качестве показателя экономической целесообразности, который рассчитывается только в случае успешного прохождения натурных испытаний, можно ввести величину ЭЦ, равную:

$$\text{ЭЦ} = \text{Ц}_{\text{ПО}} \cdot A \cdot Q \cdot t_{\text{туш}}, \quad (7)$$

где $\text{Ц}_{\text{ПО}}$ – цена за 1 л пенообразователя, руб./л;

$A = 1/60$ – переводной коэффициент, с·мин⁻¹;

Q – расход ПО (для АУП принимается $Q = Q_{\text{АУП}}$ по (3)), л/мин;

$t_{\text{туш}}$ – время тушения, с.

Принимая во внимание среднюю стоимость ПО, находящуюся в диапазоне 4–9 руб./л (для расчетов принято 7 руб./л), а также определенные ранее во время испытаний значения Q и $t_{\text{туш}}$, можно провести расчет значений ЭЦ для устройств и установок, успешно прошедших испытания (табл. 8).

По аналогии с коэффициентом $K_{КТ}$ можно ввести коэффициент экономической целесообразности $K_{Э}$:

$$K_{Э} = \text{ЭЦ}_{\text{СВП}} / \text{ЭЦ}, \quad (8)$$

где $\text{ЭЦ}_{\text{СВП}}$ – эталонный (базовый) показатель экономической целесообразности (принимается равным показателю эффективности тушения ствола СВП), руб.;

ЭЦ – показатель экономической целесообразности для исследуемого устройства или установки, руб.

Таким образом, по расчетному коэффициенту $K_{Э}$ можно судить, во сколько раз дешевле или дороже будет стоить процесс ликвидации чрезвычайной ситуации тем или иным средством (устройством или установкой) по сравнению с генератором пены СВП. Здесь важно еще раз подчеркнуть, что оценка по формуле (8) производится только в случае успешного тушения пожара.

В таблице 8 представлены значения коэффициента $K_{Э}$ для установок и устройств, которые прошли испытания.

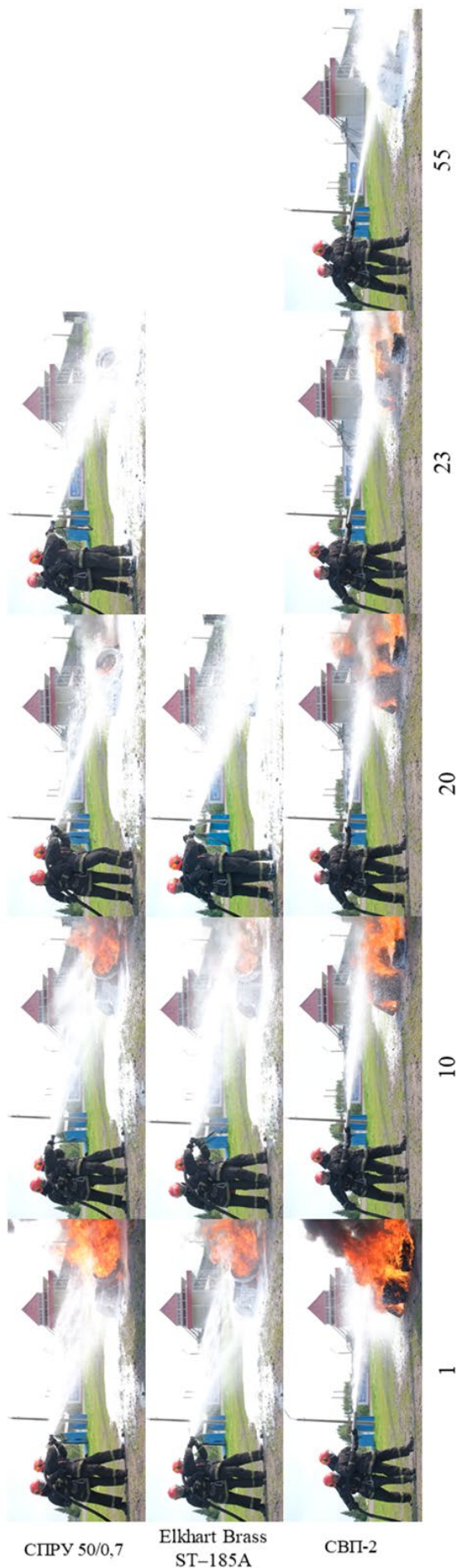


Рисунок 7. – Время тушения модельного очага пожара класса А с помощью УГКП, с

Таблица 7. – Огнетушащая эффективность и коэффициент качества тушения для всех исследуемых в работе устройств и установок

Исследуемое устройство или установка	по рукавной линии подается раствор пенообразователя				Ороситель V2	ДПУ-15	ДВН-11	по рукавной линии подается пена	
	СВП	НВП-11/0,6 У1	ВПН СПРУК 50/0,7	СВП-2				СПРУ 50/0,7	Elkhart Brass ST-185A
Показатель E_f при тушении модельного очага пожара, $m^2 / (л \cdot мин) \cdot 10^{-2}$:	класс А	12,09	106,48	1,44	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены
	класс В	68,6	79,86	–					
Коэффициент качества тушения $K_{кт}$ модельного очага пожара:	класс А	1,0	7,67	0,12	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены	испытания не предусмотрены
	класс В	1,0	10,44	–					
					19,45	7,81	4,59		
					2,54	1,02	0,6		

Таблица 8. – Огнетушащая эффективность и коэффициент качества тушения для всех исследуемых в работе устройств и установок

Устройство или установка	СВП	НВП-11/0,6 У1	ВН СПРУК 50/0,7	СВП-2	Ороситель V2	ДПУ-15	ДВН-11	СПРУ 50/0,7	Elkhart Brass ST-185A
ЭЦ при тушении модельного очага пожара, руб.:									
класса А	30	19	7	11	испытания не предусмотрены			2	5
класса В	35	7	7	–	631	1130	1237	испытания не предусмотрены	
Коэффициент экономической целесообразности $K_{\text{Э}}$ при тушении модельного очага пожара:									
класса А	1,00	1,60	4,47	2,87	испытания не предусмотрены			14,45	6,17
класса В	1,00	5,12	5,22	–	0,06	0,03	0,03	испытания не предусмотрены	

Самыми бюджетным оказались установки генерирования компрессионной пены. Так, стоимость ликвидации (тушения) модельного очага пожара класса А при использовании стволов СПРУ 50/0,7 и Elkhart Brass ST-185A оказалось более чем в 14 и 6 раз дешевле, чем при использовании водопенного ствола СВП. В том случае, когда время ликвидации чрезвычайной ситуации $t_{\text{туш}}$ не является первоочередной и главной задачей (нет угрозы жизни людей и порчи имущества), то коэффициент качества тушения $K_{\text{КТ}}$ может рассматриваться как второстепенный после коэффициента экономической целесообразности $K_{\text{Э}}$.

Заключение

Разработана комплексная методика оценки эффективности тушения воздушно-механической пеной низкой кратности, включающая методику проведения натуральных испытаний устройств для формирования воздушно-механической пены низкой кратности при тушении модельных очагов пожара класса А и В. Данная методика позволяет с минимальными временными и материальными затратами смоделировать близкую к реальным условиям пожара ситуацию, испытать в этих условиях устройства для формирования пены и сравнить их огнетушащую эффективность по специальному показателю эффективности тушения E_t , учитывая время тушения пожара и расход раствора пенообразователя, а также сравнить эффективность процесса через коэффициент качества тушения $K_{\text{КТ}}$.

Кроме коэффициента качества тушения $K_{\text{КТ}}$ вводится коэффициент экономической целесообразности $K_{\text{Э}}$, по которому можно сравнить стоимость тушения пожара тем или иным средством пожаротушения по сравнению с тушением такого же пожара, но с помощью генератора пены СВП. Коэффициенты $K_{\text{КТ}}$ и $K_{\text{Э}}$ могут выступать в качестве критериев для принятия решения по использованию конкретных установок и устройств для тушения пожаров. В том случае, когда скорость тушения пожара является первоочередной задачей, на первое место в качестве критерия выбора средства тушения выходит коэффициент $K_{\text{КТ}}$. Когда на первом месте экономия денежных средств и экологическая безопасность (минимальный экологический ущерб будет оказан при минимальном расходе пенообразователя), в качестве критерия выбора станет коэффициент $K_{\text{Э}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баратов, А.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в 2 кн. / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук [и др.]. – М.: Химия, 1990. – Кн. 1. – 496 с.
2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2019. – 224 с.
3. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с расходом до 5 л/с и возможностью формирования воздушно-механической пены / А.Н. Камлюк, В.В. Пармон,

- А.А. Морозов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – Т. 1, № 40. – С. 76–85. – EDN: ZEUEPZ.
4. Камлюк, А.Н. Пеногенератор пожарного ствола СПРУК 50/0,7 «Викинг» / А.Н. Камлюк, В.В. Пармон, М.Ю. Стриганова [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 335–342. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.335. – EDN: XWQHQT.
 5. Камлюк, А.Н. Оптимизация геометрических параметров пеногенератора пожарного ствола СПРУК 50/0,7 «Викинг» / А.Н. Камлюк, В.В. Пармон, М.Ю. Стриганова, А.А. Морозов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 4. – С. 470–476. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.470. – EDN: YPMHRR.
 6. Морозов, А.А. Влияние места установки пеногенерирующей сетки пеногенератора пожарного ствола СПРУК 50/0,7 «ВИКИНГ» на кратность пены / А.А. Морозов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 2 (44). – С. 130–136. – EDN: YPRKEZ
 7. Патент ВУ 12065, МПК А 62С 31/12. Воздушно-пенный насадок пожарного ствола: № u 20190035: заявл. 07.02.2019; опубл. 30.08.2019 / А.Н. Камлюк, В.В. Пармон, А.А. Морозов, А.В. Грачулин; заявитель Университет гражданской защиты МЧС Беларуси.
 8. Камлюк, А.Н. Об эффективности тушения пожара воздушно-механической пеной низкой кратности, формируемой генераторами пены / А.Н. Камлюк, А.А. Морозов, А.В. Пивоваров // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т. 7, № 4. – С. 355–369. – DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-4.355. – EDN: DFSSQD.
 9. Карпенчук, И.В. Реологические особенности при подаче пены пеногенерирующими системами со сжатым воздухом / И.В. Карпенчук, А.В. Грачулин // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 88–95. – EDN: SMZWDT.
 10. Навроцкий, О.Д. Исследование параметров пены, подаваемой с помощью пеногенерирующих систем со сжатым воздухом / О.Д. Навроцкий, Ю.В. Заневская, И.В. Карпенчук [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2011. – № 2 (30). – С. 125–132. – EDN: WJLKQV.
 11. Навроцкий, О.Д. Пеногенерирующие системы со сжатым воздухом – средство пенного пожаротушения нового поколения / О.Д. Навроцкий, Ю.В. Заневская, В.К. Емельянов [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 1 (15). – С. 22–31. – EDN: SMZWFR.
 12. Мазуренко, М.В. Эффективность тушения пожаров с помощью пеногенерирующих систем со сжатым воздухом / М.В. Мазуренко, О.Д. Навроцкий, С.М. Палубец [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2 (32). – С. 133–139. – EDN: WCNSEZ.
 13. Навроцкий, О.Д. Новые технологии тушения пожаров с использованием пеногенерирующих систем со сжатым воздухом / О.Д. Навроцкий, С.М. Палубец, С.М. Малащенко, А.В. Грачулин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2013. – № 2 (34). – С. 150–155. – EDN: WDKVML.
 14. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов. – Мн.: УГЗ, 2023. – 244 с.
 15. Камлюк, А.Н. Экспериментальные исследования влияния конструктивных элементов оросителей на кратность воздушно-механической пены / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 167–177. – DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.167. – EDN: YSRVQD.
 16. Лихоманов, А.О. О взаимосвязях геометрических параметров оросителя, устойчивости и кратности получаемой пены / А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор, А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 174–185. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.165. – EDN: ZKVVQJ.
 17. Абдурагимов, И.М. Критерий тушения пожаров охлаждающими огнетушащими средствами / И.М. Абдурагимов // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1982. – Т. 27, № 1. – С. 11–17.
 18. Камлюк, А.Н. Экспериментальное определение эффективности тушения пожара класса В пеной низкой кратности, генерируемой розеточными оросителями / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 251–264. – DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.251. – EDN: EPIYWF.
 19. Камлюк, А.Н. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом / А.Н. Камлюк, О.Д. Навроцкий, А.В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 44–53. – DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-1.44. – EDN: YINHPR.

20. Абдурагимов, М.М. Количественная оценка эффективности тушения пожаров на вертикальных стальных резервуарах по новой технологии / И.М. Абдурагимов, Т.И. Абдурагимова // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 3. – С. 59–64. – DOI: 10.25257/FE.2018.3.59-64. – EDN: YKWDGH.
21. Патент ВУ 10841, МПК7 А62С31/12. Кавитационный водопенный насадок пожарного ствола: № u20150140; заявл. 27.04.2015; опублик. 30.10.2015; А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин, Д.Х. Чан; заявитель Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь.
22. Камлюк, А.Н. Исследование водопенных насадков пожарного ствола с целью повышения уровня пожарной безопасности / А.Н. Камлюк, Д.С. Максимович, Х.Д. Чан, В.В. Пармон // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2014. – № 2 (36). – С. 113–120. – EDN: WCOMWR.
23. Камлюк, А.Н. Экспериментальные исследования опытных образцов водопенного насадка / А.Н. Камлюк, Д.С. Максимович, Д.Х. Чан, А.В. Грачулин // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 2 (22). – С. 61–68. – EDN: UHHCDF.
24. Камлюк, А.Н. Численное моделирование движения огнетушащего вещества по проточному тракту водопенного насадка / А.Н. Камлюк, А.В. Ширко, А.В. Грачулин [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 60–67. – EDN: VKXNTN.
25. Чан, Д.Х. Методика расчета основных геометрических параметров водопенного насадка на ствол пожарный ручной СРК-50 / Д.Х. Чан // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2016. – № 1 (11). – С. 41–49.
26. Чан, Д.Х. Исследование характеристик водопенных насадков при различных режимах подачи огнетушащего средства / Д.Х. Чан, В.Ю. Риванс, А.Н. Камлюк // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 2 (24). – С. 88–97. – EDN: WEZNQT.

Комплексная методика оценки эффективности тушения пожаров пеной по коэффициентам качества тушения и экономической целесообразности
A comprehensive methodology for assessing the effectiveness of fire suppression with foam based on the quality of fire suppression and economic feasibility

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», ученый секретарь

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

Email: kan@ucp.by

SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Scientific Secretary

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

A COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF FIRE SUPPRESSION WITH FOAM BASED ON THE QUALITY OF FIRE SUPPRESSION AND ECONOMIC FEASIBILITY

Kamlyuk A.N.

Purpose. To develop a comprehensive methodology for evaluating the fire suppression effectiveness of low-expansion air-mechanical foam and conduct field testing of foam generating devices. To evaluate the cost-effectiveness of using low-expansion air-mechanical foam.

Methods. The fire extinguishing efficiency of foam generated by various devices was assessed experimentally, and the obtained experimental data was processed using the method of estimating and expressing the uncertainty of measurements.

Findings. A comprehensive methodology for evaluating the fire extinguishing efficiency of low-expansion air-mechanical foam has been developed. To determine the extinguishing efficiency, comparative tests were conducted: for foam generators – SVP and SVP-2 nozzles, NVP-11/0.6 U1 water-foam nozzle for the SRK-50 fire nozzle and air-foam nozzle for the SPRUK 50/0.7 fire nozzle; for compression foam generating systems – SPRU 50/0.7 fire nozzles and Elkhart Brass ST-185A with compression foam delivery; for automatic fire extinguishing systems – V2, TY 3251, DPU-15, DVN-11 sprinklers. Evaluation of economic efficiency demonstrates the feasibility of using low-expansion air-mechanical foam in extinguishing fires and allows choosing the optimal means for eliminating emergency situations both in terms of safety and cost savings.

Application field of research. The developed methodology for evaluating the fire suppression effectiveness of low-expansion air-mechanical foam can be applied in the development and modernization of domestic technical regulatory legal acts in this field, as well as for studying devices (including newly developed ones) for generating air-mechanical foam under conditions similar to a real fire. Furthermore, using this comprehensive methodology it is possible to select the most effective means for emergency response from a safety and cost perspective.

Keywords: foam generator, sprinkler, compression foam generating unit, foam expansion rate, foam extinguishing efficiency, extinguishing time, extinguishing agent consumption, economic efficiency.

(The date of submitting: October 2, 2025)

REFERENCES

1. Baratov A.N. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya [Fire and explosion hazard substances and materials and their means of extinguishing]: ref. edition: in 2 books. Moscow: Khimiya, 1990. Book 1. 496 p. (rus)
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. Kompriionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus)
3. Kamlyuk A.N., Parmon V.V., Morozov A.A. Stvol pozharnyy ruchnoy universal'nyy kombinirovanny s raskhodom do 5 l/s i vozmozhnost'yu formirovaniya vozdušno-mekhanicheskoy peny [The fireman's barrel is hand-held universal combined with a flow rate of up to 5 liters/s and the possibility of forming air-mechanical foam]. *Scientific & Educational Problems of the Civil Protection*, 2019. Vol. 1 No. 40. Pp. 76–85. (rus). EDN: ZEUEPZ.
4. Kamlyuk A.N., Parmon V.V., Striganova M.Yu., Morozov A.A., Kurochkin A.S. Penogenerator pozhar-nogo stvola SPRUK 50/0,7 «Viking» [Foam generator of the fire nozzle SPRUK 50/0,7 «Viking»]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2 No. 3. Pp. 335–342. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.335. EDN: YPMHRR.
5. Kamlyuk A.N., Parmon V.V., Striganova M.Yu., Morozov A.A. Optimizatsiya geometricheskikh parametrov penogeneratora pozhar-nogo stvola SPRUK 50/0,7 «Viking» [Optimization of geometrical parameters of the fire removal penogenerator SPRUK 50/0.7 «Viking»]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2 No. 4. Pp. 470–476. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.470. EDN: YPMHRR.
6. Morozov A.A. Vliyanie mesta ustanovki penogeneriruyushchey setki penogeneratora pozhar-nogo stvola SPRUK 50/0,7 «VIKING» na kratnost' peny [Influence of the place of installation of the foaming generating grid of the fire stem foam generator SPRUK 50/0.7 «VIKING» on the better foam]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2018. Vol. 2 No. 44. Pp. 130–136. (rus). EDN: YPRKEZ.

7. Kamlyuk A.N., Parmon V.V., Grachulin A.V., Morozov A.A. *Vozdushno-pennyy nasadok pozharnogo stvola* [Air-foam nozzle of the fire barrel]: invention patent BY 12065. Published August 30, 2019. Applicant: University of Civil Protection. (rus)
8. Kamlyuk A.N., Morozov A.A., Pivovarov A.V. Ob effektivnosti tusheniya pozhara vozdushno-mekhanicheskoy peny nizkoy kratnosti, formiruemy generatorami peny [On the effectiveness of fire extinguishing with low-multiplicity air-mechanical foam formed by foam generators]. *Journal of Civil Protection*, 2023. Vol. 7, No. 4. Pp. 355–369. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-4.355. EDN: DFSSQD.
9. Karpenchuk I.V., Grachulin A.V. Reologicheskie osobennosti pri podache peny penogeneriruyushchimi sistemami so szhatym vozdukhom [Rheological features when supplying foam by compressed air foam systems]. *Vestnik komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2011. No. 2 (14). Pp. 88–95. (rus). EDN: SMZWDT.
10. Navrotsky O.D., Zanevskaya Yu.V., Karpenchuk I.V., Emelyanov V.K., Grachulin A.V. Issledovanie parametrov peny, podavaemoy s pomoshch'yu penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom [Study of foam parameters supplied by compressed air foam systems]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2011. No. 2 (30). Pp. 125–132. (rus). EDN: WJLKQV.
11. Navrotsky O.D., Zanevskaya Yu.V., Emelyanov V.K., Kamlyuk A.N., Karpenchuk I.V., Grachulin A.V. Penogeneriruyushchie sistemy so szhatym vozdukhom – sredstvo pennogo pozharotusheniya novogo pokoleniya [Compressed air foam generating systems – a new generation of foam fire extinguishing means]. *Vestnik komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2012. No. 1 (15). Pp. 22–31. (rus). EDN: SMZWFR.
12. Mazurenko M.V., Navrotsky O.D., Palubets S.M., Grachulin A.V., Zakharova M.V. Effektivnost' tusheniya pozharov s pomoshch'yu penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom [Fire extinguishing efficiency using compressed air foam generating systems]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2012. No. 2 (32). Pp. 133–139. (rus). EDN: WCNSEZ.
13. Navrotsky O.D., Palubets S.M., Malashenko S.M., Grachulin A.V. Novye tekhnologii tusheniya pozharov s ispol'zovaniem penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom [New fire extinguishing technologies using foam-generating systems with compressed air]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2013. No. 2 (34). Pp. 150–155. (rus). EDN: WDKVML.
14. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O. Pennyne orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing systems]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus)
15. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya konstruktivnykh elementov orositeley na kratnost' vozdushno-mekhanicheskoy peny [Experimental investigations of the influence of the structural elements of sprinklers on the expansion rate of air-mechanical foam]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 2. Pp. 167–177. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.167. EDN: YSRVQD.
16. Likhomanov A.O., Govor E.G., Kamlyuk A.N. O vzaimosvyazyakh geometricheskikh parametrov orositelya, ustoychivosti i kratnosti poluchaemoy peny [On the relationship between the sprinkler geometric parameters, stability and expansion rate of the generated foam]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 2. Pp. 174–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.165. EDN: ZKVVQJ.
17. Abduragimov I.M. Kriteriy tusheniya pozharov okhlazhdayushchimi ognitushashchimi sredstvami [The criterion for extinguishing fires with cooling fire extinguishing agents]. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva*, 1982. Vol. 27, No. 1. Pp. 11–17. (rus)
18. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. Eksperimental'noe opredelenie effektivnosti tusheniya pozhara klassa B peny nizkoy kratnosti, generiruemy rozetochnymi orositelyami [Experimental determination of the Class B fire extinguishing efficiency using low-expansion foam generated by deflector type sprinklers]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 3. Pp. 251–264. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-3.251. EDN: EPIYWF.
19. Kamlyuk A.N., Navrotsky O.D., Grachulin A.V. Tushenie pozharov penogeneriruyushchimi sistemami so szhatym vozdukhom [Fire extinguishing by compressed air foam systems]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 1. Pp. 44–53. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-1.44. EDN: YINHPR.
20. Abduragimov I.M., Abduragimova T.I. Kolichestvennaya otsenka effektivnosti tusheniya pozharov na vertikal'nykh stal'nykh rezervuarakh po novoy tekhnologii [Quantitative estimation of vertical steel tanks fire extinguishment efficiency using a new technology]. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2018. No. 3. Pp. 59–64. (rus). DOI: 10.25257/FE.2018.3.59-64. EDN: YKWDGH.
21. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V., Tran D.H. Kavitatsionnyy vodoplenny nasadok pozharnogo stvola [Cavitation water-foam nozzle for a fire barrel]: utility model patent BY 10841. Published October 30,

2015. Applicant: Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus. (rus)
22. Kamlyuk A.N., Maksimovich D.S., Tran D.H., Parmon V.V. Issledovanie vodoplennykh nasadkov pozharnogo stvola s tselyu povysheniya urovnya pozharnoy bezopasnosti [Study of water and foam nozzles fire barrel in order to improve fire safety]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2014. No. 2 (36). Pp. 113–120. (rus). EDN: WCOMWR.
23. Kamlyuk A.N., Maksimovich D.S., Tran D.H., Grachulin A.V. Eksperimental'nye issledovaniya opytnykh obraztsov vodopennogo nasadka [Experimental research of prototypes of water-foam nozzle]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2015. No. 2 (22). Pp. 61–68. (rus). EDN: UHHCDF.
24. Kamlyuk A.N., Shirko A.V., Grachulin A.V., Nguyen D.A., Tran D.H. Chislennoe modelirovanie dvizheniya ognitushashchego veshchestva po protochnomu traktu vodopennogo nasadka [Numerical modeling of the motion of the extinguishing agent in flow path of water-foam nozzle]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 60–67. (rus). EDN: VKXNTN.
25. Tran D.H. Metodika rascheta osnovnykh geometricheskikh parametrov vodopennogo nasadka na stvol pozharnyy ruchnoy SRK-50 [Calculation method main geometrical parameters of water-foam nozzle on the SRK-50]. *Emergency Situations: Education and Science*, 2016. No. 1 (11). Pp. 41–49. (rus)
26. Tran D.H., Rivans V.Yu., Kamlyuk A.N. Issledovanie kharakteristik vodoplennykh nasadkov pri razlichnykh rezhimakh podachi ognitushashchego sredstva [Research of water-foam nozzles characteristics in various modes of extinguishing agent discharging]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 2 (24). Pp. 88–97. (rus). EDN: WEZNQT.

Copyright © 2026 Kamlyuk A.N.

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

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОМОЩНИК ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ И ПОДДЕРЖКИ ОКАЗАНИЯ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ ГЛАЗ И КОЖИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Шамсудинов Г.Ю., Морозов В.В., Широков Г.С., Яровой В.Ю., Михайлова А.К.

Цель. Разработка и валидация глубокой нейронной сети для задач компьютерного зрения, позволяющей в условиях ограниченного времени и ресурсов автоматически классифицировать патологические состояния глаз и кожи, полученные в результате техногенных и природных чрезвычайных ситуациях (ЧС), а также укусов животных и насекомых. Предложить алгоритм оказания первой помощи.

Методы. Разработка архитектуры глубокой нейронной сети, обучение модели на расширенном наборе данных изображений патологических состояний глаз и кожи, валидация результатов с использованием стандартных метрик компьютерного зрения.

Результаты. Разработана глубокая нейронная сеть, демонстрирующая высокую точность классификации патологий глаз и кожи, включая последствия укусов животных и насекомых, на расширенном наборе данных. Установлена новизна подхода в автоматизации первой помощи в ЧС, что позволяет сократить время диагностики и повысить точность в различных условиях, включая деятельность МЧС по ликвидации биолого-социальных рисков в зонах бедствий.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы для внедрения модели в системы первой помощи при ЧС, мобильные приложения и устройства для спасателей, а также для решения других задач в области безопасности жизнедеятельности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, первая помощь, безопасность жизнедеятельности, анализ данных.

(Поступила в редакцию 9 октября 2025 г.)

Введение

Обеспечение безопасности и сохранение здоровья человека в ЧС являются одними из приоритетных задач современного общества, особенно в контексте деятельности МЧС по минимизации медико-санитарных и биолого-социальных рисков [1]. ЧС, такие как аварии, опасные природные явления, катастрофы или техногенные бедствия, часто приводят к множественным повреждениям кожи и глаз, а также укусам животных и насекомых (например, клещей или змей в зонах лесных пожаров и наводнений), требующим оперативной первой помощи от спасателей или очевидцев без медицинской подготовки [2]. В сложных ситуациях, когда невозможно сразу обратиться к врачу, например на месте техногенной аварии или в зоне природного бедствия с повышенным риском биологических угроз, решающую роль играет корректно и своевременно оказанная первая помощь. Однако эффективность ее оказания напрямую зависит от компетентности очевидца, который далеко не всегда обладает необходимыми знаниями и опытом в условиях стресса и ограниченного времени.

Существующие мобильные приложения и справочники нередко требуют от пользователя самостоятельного описания симптомов и выбора решений из сложных иерархических меню, что в стрессовой ситуации может быть затруднительно. В результате люди часто прибегают к самостоятельному поиску информации в интернете по описанию проявлений поражения. Высокая вероятность ошибки, низкая достоверностью источников и склонностью находить наихудшие из возможных диагнозов, приводит к развитию феномена, известного как «киберхондрия» [3]. Подобные действия не только затягивают время оказания помощи, но и могут напрямую навредить: от применения неподходящих лекарственных препаратов до игнорирования реальной угрозы из-за неверной интерпретации найденной информации. Решением данной проблемы может стать разработка портативного интеллектуального помощника, способного с высокой точностью определять патологическое состояние и составлять алгоритмы для оказания первой помощи.

Основная часть

Анализ предметной области. Учитывая высокую распространенность и разнообразие случаев повреждений кожи и глаз, а также укусов животных и насекомых в ЧС техногенного и природного характера, связанных с пожарами, химическими авариями, миграцией фауны в зонах бедствий и иными факторами, авторами были выделены три ключевые категории патологий, наиболее часто требующие первоначальной визуальной диагностики для оказания первой помощи:

– повреждения кожных покровов: термические и химические ожоги от пожаров и аварий, раны и ссадины от обвалов или взрывов, аллергические реакции на химикаты, обморожения в условиях природных катастроф, а также воспалительные и инфекционные поражения в зонах бедствий;

– патологии глаз: неотложные состояния, связанные с органами зрения, такие как попадание инородных тел при обвалах, ожоги от химических веществ в техногенных ЧС, воспалительные изменения слизистой от дыма или пыли;

– последствия укусов животных и насекомых: укусы змей, собак, клещей и т.д., усугубляющиеся в природных ЧС (например, клещевые инфекции после лесных пожаров), с риском заражения и анафилактического шока.

Данный выбор категорий обусловлен следующими критериями:

– высокая частота встречаемости в ЧС природного и техногенного характера, включая биолого-социальные риски, а также при нарушениях промышленной и пожарной безопасности;

– необходимость скорости и точности идентификации для дальнейшего корректного оказания помощи в условиях ограниченных ресурсов и массовых пострадавших;

– ярко выраженная визуальная симптоматика, что делает возможным и целесообразным применение компьютерного зрения для их распознавания.

В сравнении с бытовыми условиями (одиночные, не экстренные случаи), ЧС и нарушения промышленной безопасности характеризуются массовостью пострадавших, дефицитом времени и медицинских средств, особенно при биологических рисках, что подчеркивает ценность автоматизированных технических решений для оперативной диагностики и минимизации медико-санитарных последствий.

Существующие решения. В условиях активной цифровизации различных сфер человеческой деятельности технологии искусственного интеллекта (ИИ) демонстрируют растущий потенциал в решении комплексных задач, связанных с обработкой информации и поддержкой принятия решений [4]. Медицинская отрасль и область безопасности жизнедеятельности не являются исключением: в настоящее время разрабатываются и внедряются интеллектуальные системы, способные анализировать большой объем данных, а также составлять рекомендации по будущим операциям и/или лечению [5].

Ключевым требованием к любому инструменту для оказания первой помощи является его доступность и простота использования для человека с любым уровнем подготовки – от школьника до доктора наук. В стрессовой ситуации человек не должен описывать свою патологию или разбираться в сложных меню, ему нужен инструмент, которому можно просто продемонстрировать проблему. Это требование напрямую указывает на необходимость использования технологий, способных анализировать визуальные данные.

Наиболее прямым и эффективным подходом для этой цели является компьютерное зрение [6]. Проведем сравнительный анализ различных технологий ИИ, применимых для анализа изображений и выберем наиболее подходящий под поставленную задачу. В рамках самого компьютерного зрения существует несколько ключевых инструментов и фреймворков для создания подобных систем:

1. TensorFlow [7]. Открытая библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google. Она предоставляет комплексную экосистему для создания и обучения глубоких нейронных сетей, которые являются основой для задач классификации изображений, распознавания объектов и сегментации.

2. PyTorch [8]. Популярный фреймворк машинного обучения от компании Meta, известный своей гибкостью и динамическим графом вычислений. Он широко используется в исследовательских кругах и промышленности для быстрого прототипирования и развертывания сложных моделей компьютерного зрения.

3. OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [9]. Фундаментальная библиотека, предоставляющая огромный набор готовых алгоритмов для обработки изображений и видео

в реальном времени. OpenCV часто используется для предварительной обработки данных (например, изменения размера, фильтрации).

4. Keras [10]. Высокоуровневый API для работы с нейронными сетями, который может работать поверх TensorFlow. Keras спроектирован для простой разработки моделей, что делает его инструментом для быстрого прототипирования и проведения экспериментов.

В таблице представлено сравнение фреймворков для компьютерного зрения.

Таблица. – Сравнительный анализ фреймворка искусственного интеллекта

Критерий	TensorFlow	PyTorch	OpenCV	Keras
Уровень функциональных возможностей	Высокий	Средний	Низкий	Высокий
Основное назначение	Создание и развертывание моделей машинного обучения	Быстрое прототипирование и исследования	Обработка изображений и видео в реальном времени	Упрощенное создание нейронных сетей
Системные требования	Низкие (работает за счет обученной модели)	Высокие	Высокие	Низкие (работает за счет интернета)
Простота освоения	Легкий	Сложный	Умеренный	Очень легкий

Проведенный сравнительный анализ ключевых фреймворков компьютерного зрения позволяет сделать однозначный выбор в пользу TensorFlow для реализации проекта интеллектуального помощника.

Согласно представленным данным такие инструменты, как PyTorch и OpenCV, не являются оптимальными для поставленной задачи из-за высоких системных требований и более низкого уровня функциональных возможностей или простоты освоения, помощник необходимо запускать не только на персональных компьютерах с мощными характеристиками, но и на портативных устройствах.

В то же время TensorFlow и Keras демонстрируют высокие функциональные возможности и низкие системные требования. Однако одно из главных требований интеллектуального помощника – это автономность, ведь в определенных условиях (например, в лесу) не будет возможности обеспечить стабильное подключение к интернету, что еще раз подтверждает выбор TensorFlow.

В настоящее время на рынке представлен ряд коммерческих приложений, реализующих элементы компьютерного зрения с помощью фреймворка TensorFlow для медицинской диагностики. Среди наиболее известных международных решений следует отметить:

SkinVision (ЕС) – анализ фотографий кожных образований для раннего выявления меланомы;

Ada Health (Германия) – наблюдение за здоровьем с элементами компьютерного зрения;

Google Lens (США) – универсальная система визуального поиска, включая распознавание растений и животных;

Microsoft Dermatology (США) – экспериментальный ИИ-сервис для классификации кожных заболеваний.

При анализе архитектуры данных приложений становится очевидно, что они не подходят для комплексного решения задач первой помощи. Их модели и алгоритмы настроены на узкоспециализированные задачи, в основном на дерматологию, и часто работают как текстовые помощники, где анализ фото является лишь дополнением.

На основе этого можно выделить две ключевые проблемы. Во-первых, все представленные на рынке продукты созданы зарубежными компаниями, что говорит об отсутствии отечественных разработок в данной сфере.

Во-вторых, что является главным ограничением, не существует единого инструмента для комплексной визуальной диагностики. Текущие решения не перекрывают весь спектр травм, требующих оказания первой помощи. Область применения искусственного интеллекта для быстрой оценки повреждений кожи, глаз и последствий укусов остается недостаточно изученной.

Таким образом, подтверждается наличие потребности в отечественном специализированном решении. Практическая применимость такого инструмента заключается именно в комплексной оценке различных повреждений и формировании алгоритмов по оказанию первой помощи, что и является целью данной работы.

Помощник, основанный на технологии компьютерного зрения «ЗдравСкан». Для реализации интеллектуального помощника, ориентированного на визуальную диагностику состояний, требующих первой помощи, была разработана модульная архитектура на основе глубокого обучения с использованием фреймворка TensorFlow.

Выбор TensorFlow объясняется тем, что это удобный и мощный инструмент: он поддерживает разные типы нейросетей, позволяет легко настраивать параметры обучения и имеет множество встроенных функций для подготовки и обработки данных – от увеличения набора изображений до проверки качества модели.

Модель была обучена на собственном расширенном датасете¹ [11], включающем три ключевые категории:

- повреждения кожи (ожоги, ссадины, аллергические реакции, инфекционные поражения от ЧС);
- повреждения глаз (попадание инородных тел, воспаление слизистой оболочки, химические ожоги);
- последствия укусов животных и насекомых (укусы змей, собак, клещей и др., с изображениями отеков, ран и аллергических реакций в условиях ЧС).

Каждая категория содержала не менее 5000 изображений, собранных из открытых медицинских источников, а также созданных с помощью изменения данных фотографии (повороты, изменение яркости, шум, приближение). Примеры таких изображений представлены на рисунке 1. Для обеспечения объективности и точности модели изображения были точно размечены и равномерно распределены по всем классам.



Рисунок 1. – Изображения для обучения модели

В качестве базовой архитектуры была выбрана предобученная модель EfficientNetB3 [12], дообученная на датасете авторов с заморозкой первых 100 слоев для сохранения обобщающих признаков.

Финальная часть модели включала два полносвязных слоя с функцией активации ReLU (Rectified Linear Unit [13] – «выпрямленный линейный блок» (активирует только положительные значения), с применением механизма Dropout («выключение» 50 % нейронов на каждом шаге обучения для предотвращения переобучения), и завершалась выходным слоем с функцией Softmax, преобразующей выходные значения в вероятности принадлежности к одному из трех классов.

Обучение модели осуществлялось с применением оптимизатора ADMM [14] (алгоритм адаптивной настройки скорости обучения, с шагом 0,0001 величины обновления весов модели), функции потерь categorical_crossentropy (категориальная кросс-энтропия – измеряет разницу между предсказанным и истинным распределением классов) и метрики accuracy (доля правильно классифицированных изображений).

Для обучения и оценки модели исходный набор данных был разделен на три независимые части:

- 1) обучающая выборка – на этих изображениях модель непосредственно обучалась;
- 2) валидационная выборка – использовалась для проверки качества обучения и предотвращения переобучения;
- 3) проверочная выборка – полностью независимые, сторонние данные, которые модель никогда не видела. На них проверялась итоговая работоспособность.

Для повышения обобщающей способности модели и предотвращения переобучения использовались следующие методы:

¹ Датасет (англ. Dataset) – структурированная и организованная коллекция данных, используемая для обучения, тестирования и анализа моделей, особенно в машинном обучении и искусственном интеллекте.

- ранняя остановка (EarlyStopping, patience = 10) – обучение автоматически прекращалось, если точность на валидационной выборке не улучшалась в течение 10 эпох²;
- сохранение лучшей модели – фиксировалась версия сети с наивысшей точностью на валидации;
- аугментация данных в реальном времени – изображения динамически изменялись (повороты, масштабирование, сдвиги) во время обучения, чтобы повысить устойчивость модели к вариациям входных данных и улучшить ее работу на изображениях, которые не входили в обучающую выборку.

Модель показала высокую точность на проверочной выборке – 94,7 % (рис. 2), что говорит о хорошей способности к обобщению. Она успешно распознает различные объекты даже при изменении освещения, угла съемки и фона.

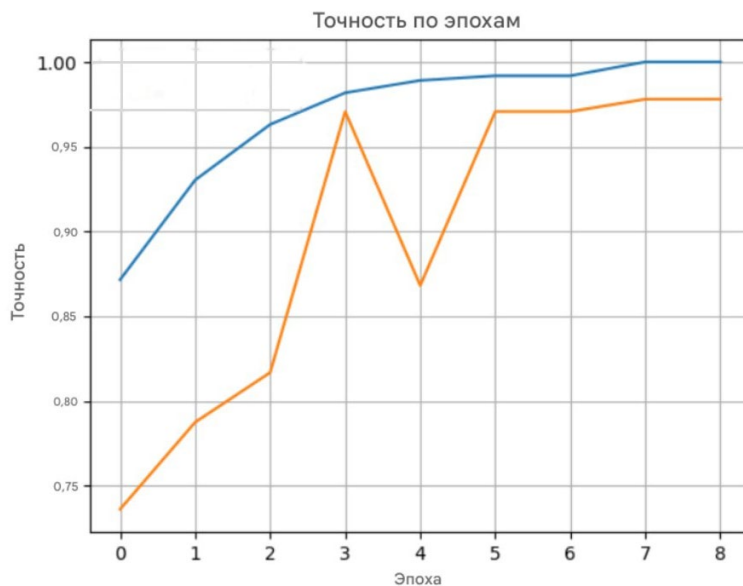


Рисунок 2. – График точности обучения модели на протяжении всех эпох (синяя кривая – насколько хорошо модель определяет правильные ответы на обучающей выборке, оранжевая кривая – насколько хорошо модель определяет правильные ответы на проверочной выборке)

Для обеспечения максимальной доступности и удобства использования разработанная модель была интегрирована в Telegram-бота (рис. 3), что позволило пользователям взаимодействовать с системой через привычный интерфейс мессенджера, без необходимости установки отдельного приложения. Выбор Telegram в качестве платформы для реализации проекта обусловлен его широкой распространенностью среди пользователей, высокой степенью доступности (включая поддержку на всех основных операционных системах и устройствах) и кроссплатформенной архитектурой [15].

Серверная часть бота разработана на языке программирования Python с помощью библиотеки FastAPI [16] для обработки запросов пользователя, которые поступают на сервер. Интерфейс Telegram Bot API воссоздан через библиотеку python-telegram-bot.

Также разработано специальное веб-приложение (рис. 4) на основе Telegram Mini App. Использование Telegram Mini App в качестве интерфейса для проекта «ЗдравСкан» предоставляет пользователю существенно более удобный и функциональный опыт по сравнению с традиционным Telegram-ботом, поскольку веб-приложение позволяет реализовать полноценный графический интерфейс с поддержкой интерактивных элементов. Интерфейс веб-приложения создан с помощью JavaScript-библиотеки React [17]. Она позволяет упростить создание интерфейсов на основе компонентов, повысить производительность и упростить разработку.

Алгоритмы оказания первой помощи. Помощник «ЗдравСкан» не ограничивается диагностикой, а предоставляет комплексные рекомендации по первой помощи, интегрированные с моделью компьютерного зрения. На основе распознанного диагноза бот генерирует

² Эпоха – в сфере искусственного интеллекта это один полный цикл прохода всего обучающего набора данных через алгоритм, в ходе которого модель видит каждый пример один раз и корректирует свои внутренние параметры.

алгоритмы оказания первой помощи, одобренные медицинскими сотрудниками. Это особенно полезно для лиц без медицинской подготовки, поскольку инструкции подаются в простом, визуальном формате: текстовые шаги с инфографикой.

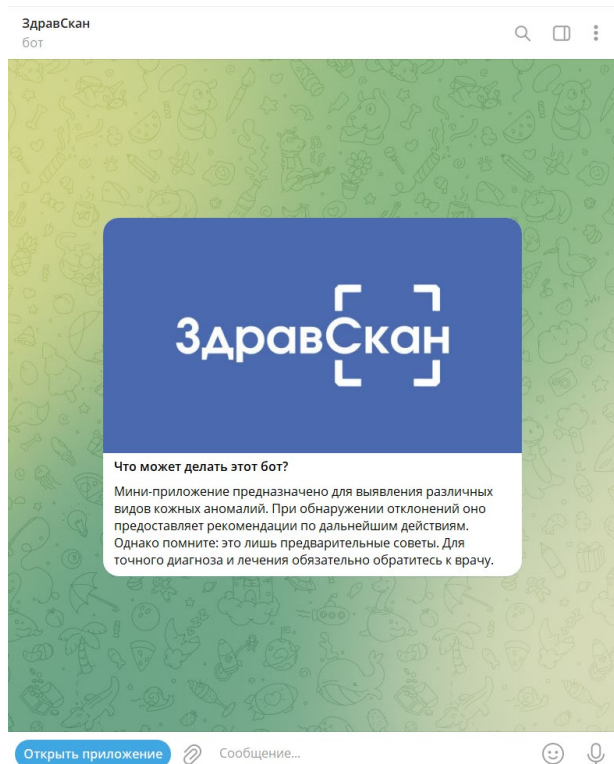


Рисунок 3. – Стартовый экран telegram-бота



Рисунок 4. – Интерфейс веб-приложения

Заключение

В рамках исследования была успешно решена задача разработки интеллектуального помощника «ЗдравСкан», предназначенного для автоматизированной диагностики и поддержки оказания первой помощи при повреждениях глаз и кожи в чрезвычайных ситуациях. Таким образом, представлен готовый к практическим испытаниям отечественный инструмент, способный повысить качество и своевременность оказания первой помощи в деятельности МЧС за счет быстрой и объективной визуальной оценки повреждений и биорисков от техногенных и природных ЧС. Дальнейшим шагом является комплексная апробация системы для подтверждения ее эффективности в реальных условиях ликвидации ЧС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Найданов, Б.Н. Сохранение и развитие общественного здоровья как приоритетная задача населения и государства / Б.Н. Найданов, А.К. Захаров // Вестник Бурятского государственного университета. Философия. – 2014. – № 6 (1). – С. 6–12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sohranenie-i-razvitie-obschestvennogo-zdorovya-kak-prioritetnaya-zadacha-naseleniya-i-gosudarstva> (дата обращения: 18.09.2025).
2. Shpakovsky, A.D. First aid assistance – aspects for tourist activities / A.D. Shpakovsky, V.G. Bubnov, V.E. Pinaev // World of Science. Pedagogy and psychology. – 2019. – Vol. 7, No. 4. – Article 29. – 11 p. – EDN: BOGENJ.
3. Ростовцева, Н.А. Киберхондрия – самостоятельное явление или проявление ипохондрических особенностей онлайн? // Н.А. Ростовцева, Е.И. Рассказова, А.Ш. Тхостов, В.А. Емелин // Национальный психологический журнал. – 2022. – № 1 (45). – С. 76–93. – DOI: 10.11621/npj.2022.0107. – EDN: JPUPRQ.
4. Pannu, A. Artificial intelligence and its application in different areas / A. Pannu, M.T. Student // International Journal of Engineering and Innovative Technology. – 2015. – Vol. 4, No. 10. – P. 79–84. – URL: https://www.ijeit.com/Vol%204/Issue%2010/IJEIT1412201504_15.pdf (date of access: 18.09.2025).
5. Nurtassova, A. The Introduction of artificial intelligence (AI) in medicine – opportunities and obstacles / A. Nurtassova, A. Alkanova // Bulletin of the Innovative University of Eurasia. – 2025. – No. 2 (98). – P. 135–140. – DOI: 10.37788/2025-2/135-140. – EDN: KXLTLW.

6. Voulodimos, A. Deep learning for computer vision: a brief review / A. Voulodimos, N. Doulamis, A. Doulamis, E. Protopapadakis // *Computational Intelligence and Neuroscience*. – 2018. – Vol. 2018. – Article 7068349. – 13 p. – DOI: 10.1155/2018/7068349.
7. TensorFlow Developers: an end-to-end open source platform for machine learning. Version v2.8.2 // Zenodo: [repository]. – Published May 23, 2022. – DOI: 10.5281/zenodo.6574269.
8. Imambi, S. PyTorch / S. Imambi, K.B. Prakash, G.R. Kanagachidambaresan // *Programming with TensorFlow: solution for edge computing applications* / Ed.: K.B. Prakash, G.R. Kanagachidambaresan. – Cham: Springer, 2021. – P. 87–104. – (Series: EAI/Springer Innovations in Communication and Computing). – DOI: 10.1007/978-3-030-57077-4_10.
9. Bradski, G. The OpenCV Library / G. Bradski // *Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer*. – 2000. – Vol. 25, No. 11. – P. 120–123. – EDN: EOYXGL.
10. Gulli, A. Deep learning with Keras / A. Gulli, S. Pal. – Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2017. – 308 p.
11. Chapman, A. Dataset search: a survey / A. Chapman, S. Simakov, E. Stoyanovich [et al.] // *The VLDB Journal (The International Journal on Very Large Data Bases)*. – 2020. – Vol. 29, No. 1. – P. 251–272. – DOI: 10.1007/s00778-019-00564-x.
12. Batool, A. Lightweight EfficientNetB3 model based on depthwise separable convolutions for enhancing classification of leukemia white blood cell images / A. Batool, Y.-C. Byun // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 37203-37215. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3266511.
13. Hara, K. Analysis of function of rectified linear unit used in deep learning / K. Hara, D. Saito, H. Shouno // *Proc. of 2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Killarney, Ireland, July 12-17, 2015. – IEEE, 2015. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/IJCNN.2015.7280578.
14. Mota, J.F.C. D-ADMM: A communication-efficient distributed algorithm for separable optimization / J.F.C. Mota, J.M.F. Xavier, P.M.Q. Aguiar, M. Püschel // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2013. – Vol. 61, No. 10. – P. 2718-2723. – DOI: 10.1109/TSP.2013.2254478.
15. Морозов, В.В. Разработка и апробирование автоматизированной системы для оказания первой помощи на базе Telegram-бота / В.В. Морозов, А.К. Михайлов, В.В. Чесноков // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. – 2025. – № 2 (37). – С. 80–88. – DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.78.73.020. – EDN: JWJOZS.
16. Wu, X. FastAPI as a backend framework: bachelor's degree thesis / Wu Xiaomin: Tampere University of Applied Sciences. Tampere, 2024. – 25 p. – URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/855956/Wu_Xiaomin.pdf?sequence=3&isAllowed=y (date of access: 18.09.2025).
17. Chen, S. Front-end development in react: an overview / S. Chen, U.R. Thaduri, V.K.R. Ballamudi // *Engineering International*. – 2019. – Vol. 7, No. 2. – P. 117–126. – DOI: 10.18034/ei.v7i2.662.

Нейросетевой помощник для автоматизированной диагностики и поддержки оказания первой помощи при повреждении глаз и кожи в чрезвычайных ситуациях

Neural network assistant for automated diagnostics and first aid support for eye and skin injuries in emergency situations

Шамсудинов Глеб Юрьевич

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»), факультет инженеров пожарной безопасности, курсант

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия
Email: gleb.shamsudinov@mail.ru
SPIN-код: 9108-2708

Gleb Yu. Shamsudinov

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia (Federal State Budget Educational Establishment of Higher Vocational Training «The Siberian Fire and Rescue Academy of State Firefighting Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»), Faculty of Fire Safety Engineers, cadet

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia
Email: gleb.shamsudinov@mail.ru
ORCID: 0009-0005-5736-0327

Морозов Вениамин Владимирович

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, факультет инженеров пожарной безопасности, курсант

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия
Email: venikmix.com@gmail.com
SPIN-код: 5232-3522

Veniamin V. Morozov

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Faculty of Fire Safety Engineers, cadet

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia
Email: venikmix.com@gmail.com
ORCID: 0009-0001-5648-3780

Широков Георгий Сергеевич

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, отдел информационных технологий и компьютерного моделирования научно-технического центра, инспектор

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия
Email: ntc@sibpsau.ru
SPIN-код: 7674-1279

Georgiy S. Shirokov

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Department of Information Technology and Computer Modeling of the Scientific and Technical Center, Inspector

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia
Email: ntc@sibpsau.ru
ORCID: 0009-0002-0231-2748

Яровой Вячеслав Юрьевич

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, кафедра пожарной тактики и аварийно-спасательных работ, преподаватель

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия
Email: yarovoiviacheslav@yandex.ru
SPIN-код: 8454-3940

Vyacheslav Yu. Yarovoy

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia, Chair of Fire Tactics and Emergency Rescue Operations, Lecturer

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia
Email: yarovoiviacheslav@yandex.ru
ORCID: 0009-0008-9078-107X

Михайлова Анна Константиновна

Сибирская пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России, кафедра пожарной тактики
и аварийно-спасательных работ, доцент

Адрес: ул. Северная, 1,
662972, Железногорск,
Красноярский край, Россия

Email: it@sibpsau.ru

SPIN-код: 1569-4127

Anna K. Mikhaylova

Siberian Fire and Rescue Academy
of EMERCOM of Russia, Chair of Fire Tactics
and Emergency Rescue Operations, Lecturer

Address: Severnaya str., 1,
662972, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk Krai, Russia

Email: it@sibpsau.ru

ORCID: 0000-0003-3332-3087

NEURAL NETWORK ASSISTANT FOR AUTOMATED DIAGNOSTICS AND FIRST AID SUPPORT FOR EYE AND SKIN INJURIES IN EMERGENCY SITUATIONS

Shamsudinov G.Yu., Morozov V.V., Shirokov G.S., Yarovoy V.Yu., Mikhaylova A.K.

Purpose. Development and validation of a deep neural network for computer vision tasks, which, under conditions of limited time and resources, allows for the automatic classification of pathological conditions of the eyes and skin resulting from man-made and natural emergencies, as well as animal and insect bites, and the proposal of a first aid algorithm.

Methods. Development of a deep neural network architecture, training the model on an expanded dataset of images of pathological conditions of the eyes and skin, validation of the results using standard computer vision metrics.

Findings. A deep neural network has been developed that demonstrates high accuracy in classifying eye and skin pathologies, including animal and insect bites, on an expanded dataset. A new approach to automating first aid in emergency situations has been presented, which allows for reducing diagnostic time and increasing accuracy in various conditions, including the Ministry of Emergency Situations' activities to eliminate biological and social risks in disaster zones.

Application field of research. The obtained results can be used to implement the model in first aid systems during emergencies, mobile applications and devices for rescuers, as well as to solve other problems in the field of life safety.

Keywords: artificial intelligence, computer vision, first aid, life safety, data analysis.

(The date of submitting: October 9, 2025)

REFERENCES

1. Naydanov B.N., Zakharov A.K. Sokhranenie i razvitie obschestvennogo zdorov'ya kak prioriternaya zadacha naseleniya i gosudarstva [Maintaining and developing public health as a priority task for the population and the state]. *BSU bulletin. Philosophy*, 2014. No. 6 (1). Pp. 6–12. (rus). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sohranenie-i-razvitie-obschestvennogo-zdorovya-kak-prioriternaya-zadacha-naseleniya-i-gosudarstva> (accessed: September 18, 2025).
2. Shpakovsky A.D., Bubnov V.G., Pinaev V.E. First aid assistance – aspects for tourist activities. *World of Science. Pedagogy and Psychology*, 2019. Vol. 7, No. 4. Article 29. 11 p. EDN: BOGEHJ.
3. Rostovtseva N.A., Rasskazova E.I., Tkhostov A.Sh., Emelin V.A. Kiberkhondriya – samostoyatel'noe yavlenie ili proyavlenie ipokhondricheskikh osobennostey onlayn? [Cyberchondria: an independent phenomenon or the manifestation of hypochondriacal traits online?]. *National Psychological Journal*, 2022. No 1 (45). Pp. 76–93. (rus). DOI: 10.11621/npj.2022.0107. EDN: JPUPRQ.
4. Pannu A., Student M.T. Artificial intelligence and its application in different areas. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2015. Vol. 4, No. 10. Pp. 79–84. URL: https://www.ijeit.com/Vol%204/Issue%2010/IJEIT1412201504_15.pdf (accessed: September 18, 2025).
5. Nurtassova A., Alkanova A. The Introduction of artificial intelligence (AI) in medicine – opportunities and obstacles. *Bulletin of the Innovative University of Eurasia*, 2025. No. 2 (98). Pp. 135–140. DOI: 10.37788/2025-2/135-140. EDN: KXLTLW.
6. Voulodimos A., Doulamis N., Doulamis A., Protopapadakis E. Deep learning for computer vision: a brief review. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2018. Vol. 2018. Article 7068349. 13 p. DOI: 10.1155/2018/7068349.
7. *TensorFlow Developers: an end-to-end open source platform for machine learning. Version v2.8.2.* Zenodo: [repository]. Published May 23, 2022. DOI: 10.5281/zenodo.6574269.
8. Imambi S., Prakash K.B., Kanagachidambaresan G.R. PyTorch. In book: *Programming with TensorFlow: solution for edge computing applications*. Ed. by K.B. Prakash, G.R. Kanagachidambaresan. Cham: Springer, 2021. Pp. 87–104. (Series: EAI/Springer Innovations in Communication and Computing). DOI: 10.1007/978-3-030-57077-4_10.
9. Bradski G. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer*, 2000. Vol. 25, No. 11. Pp. 120–123. EDN: EOYXGL.
10. Gulli A., Pal S. *Deep learning with Keras*. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2017. 308 p.

11. Chapman A., Simperl E., Koesten L., Konstantinidis G., Ibáñez L.-D., Kacprzak E., Groth P. Dataset search: a survey. *The VLDB Journal*, 2020. Vol. 29, No. 1. P. 251–272. DOI: 10.1007/s00778-019-00564-x.
12. Batool A., Byun Y.-C. Lightweight EfficientNetB3 model based on depthwise separable convolutions for enhancing classification of leukemia white blood cell images. *IEEE Access*, 2023. Vol. 11. Pp 37203–37215. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3266511.
13. Hara K., Saito D., Shouno H. Analysis of function of rectified linear unit used in deep learning. *Proc. of 2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Killarney, Ireland, July 12-17, 2015*. IEEE, 2015. Pp. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN.2015.7280578.
14. Mota J.F.C., Xavier J.M.F., Aguiar P.M.Q., Püschel M. D-ADMM: A communication-efficient distributed algorithm for separable optimization. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013. Vol. 61, No. 10. Pp. 2718–2723. DOI: 10.1109/TSP.2013.2254478.
15. Morozov V.V., Mikhaylov A.K., Chesnokov V.V. Razrabotka i aprobirovaniye avtomatizirovannoy sistemy dlya okazaniya pervoy pomoshchi na baze Telegram-bot [Development and testing of an automated first aid system based on a Telegram-bot]. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*, 2025. No. 2 (37). Pp. 80–88. (rus). DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.78.73.020. EDN: JWJOZS.
16. Wu X. *FastAPI as a backend framework*: bachelor's degree thesis. Tampere University of Applied Sciences. Tampere, 2024. 25 p. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/855956/Wu_Xiaomin.pdf?sequence=3&isAllowed=y (accessed: September 18, 2025).
17. Chen S., Thaduri U.R., Ballamudi V.K.R. Front-end development in react: an overview. *Engineering International*, 2019. Vol. 7, No. 2. Pp. 117–126. DOI: 10.18034/ei.v7i2.662.

Copyright © 2026 Shamsudinov G.Yu., Morozov V.V.,
Shirokov G.S., Yarovoy V.Yu., Mikhaylova A.K.

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

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КРЕПЕЖНЫХ УЗЛАХ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Смиловенко О.О., Мартыненко Т.М., Лосик С.А., Полуян А.И., Казутин Е.Г.

Цель. Повышение работоспособности болтовых соединений опорно-поворотных устройств подъемных кранов путем заблаговременного выявления дефектов на основе системного анализа факторов (причин), влияющих на выход из строя крепежных узлов.

Методы. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований надежности крепежных узлов фланцевых соединений с учетом динамических нагрузок; моделирование процесса потери работоспособности болтового соединения с учетом перераспределения нагрузки.

Результаты. Выявлены основные причины выхода из строя болтовых узлов подъемных кранов в виде нециклической динамики функциональных нагрузок, сочетанного воздействия различных типов нагружения, которое не учитывается при проектном расчете диаметра резьбы, а также прямого влияния субъективных факторов. Сформулированы рекомендации по контролю болтовых соединений (в соответствии с Правилами по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов), в которых обоснованы и детализированы операции по проверке: момента затяжки, наличия дефектов (трещин) в теле болта, участков поверхности, пораженных коррозией.

Область применения исследований. Установка и эксплуатация подъемных кранов, оборудованных опорно-поворотным устройством фланцевого типа с болтовым креплением.

Ключевые слова: подъемный кран, опорно-поворотное устройство, болтовое соединение, потеря работоспособности, моделирование ANSYS, момент затяжки, коррозия.

(Поступила в редакцию 31 июля 2025 г.)

Введение

В Республике Беларусь функционирует порядка 2000 организаций, осуществляющих эксплуатацию более 10 000 грузоподъемных кранов, находящихся под надзором Госпромнадзора. При этом свыше 8000 единиц техники уже превысили установленный заводом-изготовителем нормативный срок службы [1]. Одним из показательных инцидентов стала авария, произошедшая на строительной площадке в Бобруйске, где в процессе возведения многоквартирного жилого дома башенный крана КБМ-401П упал на строящийся объект¹. Авария произошла в момент перемещения консоли строительной люльки массой 165 кг. По результатам расследования установлено, что причиной происшествия стало разрушение болтов крепления опорно-поворотного устройства (ОПУ) к поворотной платформе крана. К числу факторов, способствовавших аварии, отнесены недостаточный контроль за техническим состоянием оборудования со стороны ответственных лиц, а также несоблюдение регламентов технического обслуживания, предусмотренных заводом-изготовителем. Осмотр места происшествия выявил наличие коррозии на срезах 30 из 48 соединительных болтов, что свидетельствует об их разрушении до момента аварии и указывает на отсутствие своевременной диагностики.

Хотя подобный инцидент может восприниматься как единичный случай, особенно на фоне эксплуатации более 10 000 башенных кранов по всей стране, последствия таких аварий зачастую оказываются крайне серьезными. Они включают значительные экономические потери, повреждение дорогостоящего оборудования и строительных конструкций, а в отдельных случаях – гибель людей.

Согласно статистике Госпромнадзора, в 2023 г. в процессе эксплуатации грузоподъемных кранов было зарегистрировано 16 несчастных случаев, два из которых завершились летальным исходом. Основными причинами аварий признаны: использование технически неисправного оборудования, несоблюдение требований по проведению технического обслуживания и капитального ремонта, а также нарушения в организации планово-предупредительных

¹ Почему упал башенный кран // Коммерческий курьер: KOMKUR.info. – 2016 – 20 июня. – URL: <https://komkur.info/proisshestvija/pochemu-upal-v-bobruyske-bashennyu-kran> (дата обращения 30.12.2024).

ремонт и технического освидетельствования. Наиболее распространенные нарушения включают эксплуатацию кранов без предварительного диагностирования и освидетельствования, а также отсутствие надлежащего производственного контроля и технического надзора.

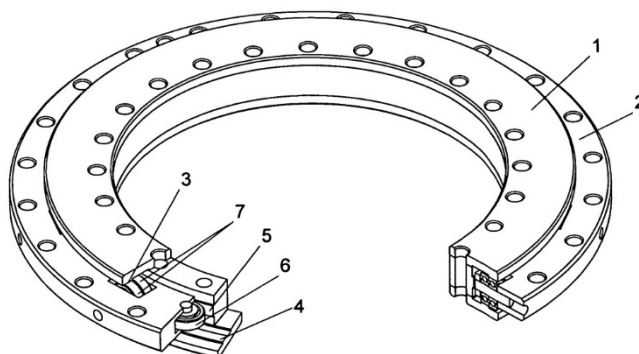
Следует подчеркнуть, что значительная часть грузоподъемной техники, используемой на строительных объектах страны, давно выработала свой ресурс. По оценкам, более 70 % эксплуатируемых кранов относятся к категории с превышенным сроком службы. Наиболее часто применяемые модели – КБ-160, КБ-503, КБ-573, КБ-674 – находятся в эксплуатации более 30 лет. При этом вопрос создания специализированных и сертифицированных организаций, способных выполнять капитальный и восстановительный ремонт грузоподъемного оборудования, остается нерешенным [2].

Основная часть

Авторами работы [3] составлена общая таблица дефектов и отказов с использованием материалов, представленных в сводных ведомостях дефектов. Башенные краны эксплуатировались в одном из регионов Российской Федерации. Предложено выделить пять групп механизмов, среди которых одна из групп – это элементы опорно-поворотного устройства. Сформирована группа однотипных башенных кранов в количестве 196 шт. (КБ 403А). За пять лет эксплуатации в ОПУ выявлено 78 отказов (дефектов). При этом в 53 случаях были ослаблены болтовые соединения (момент затяжки не соответствовал установленному значению); в 6 случаях было нарушено стопорение резьбы, а в 15 – вообще отсутствовали болты, соединяющие верхнее и нижнее кольца ОПУ; еще 4 отказа были связаны с перекосом фланцев. Таким образом, количество дефектов, связанных с неисправностью крепежных узлов опорно-поворотного устройства, составляет около 11 % от всех неисправностей.

Опорно-поворотное устройство башенного крана является связующим звеном между поворотной частью крана с рабочим оборудованием и его несущей неповоротной частью. ОПУ обеспечивает поворот крана, передает возникающие в процессе работы крана нагрузки (вертикальные и горизонтальные силы, опрокидывающий и крутящий моменты) на несущую часть.

Эти устройства (рис. 1) состоят: из разъемного кольца 1, выполненного из двух колец, связанных между собой болтами, и закрепленного к поворотной части крана, кольца 2 с зубчатым венцом, закрепленного к неповоротной части, вала 3, горизонтальных и вертикальных направляющих 4 и 5 тел качения, роликов 6 и 7. Вращение колеса 1 с поворотной платформой и всеми на ней размещенными элементами происходит за счет механизма, установленного на поворотной платформе, ведущая шестерня которого входит в зацепление с зубчатым венцом. Восприятие и передача всей совокупности нагрузок происходит через крепежные узлы, расположенные на фланце неповоротной части устройства.



1 – неподвижное кольцо; 2 – подвижное кольцо; 3 – вал;
4, 5 – горизонтальные и вертикальные направляющие; 6, 7 – ролики
Рисунок 1. – Опорно-поворотное устройство башенного крана

Крепежные узлы выполнены в виде болтовых соединений, установленных по окружности планшайбы. Работа ОПУ обеспечивается предварительной затяжкой болтов определенным усилием. В процессе эксплуатации возможно ослабление затяжки болтов, разрушение резьбы из-за неравномерной затяжки соединений. В результате происходит раскрытие стыка, возможен разрыв самих болтов и отрыв их головки.

Для обеспечения безопасной эксплуатации ОПУ с установленной периодичностью необходимо проводить обследование крепежных узлов. Так, в методических указаниях, действующих на территории России, указано следующее. Обследование болтовых соединений опорно-поворотного устройства включает визуальный осмотр, остукивание болтов, проверку затяжки. При визуальном осмотре устанавливается наличие всех болтов, стопорных планок (контровки). В случае обнаружения обрыва болтов (если их не более 2 шт.), необходимо заменить оборванные болты и провести поочередный контроль всех остальных болтов. Вывернутые болты осматриваются с целью выявления следующих дефектов: трещин, повреждений резьбы. В резьбе не должно быть искаженного профиля, забоин, сплошной коррозии резьбы. Бракуется болт при сплошной коррозии резьбы, при числе сорванных ниток резьбы более одной, смятии граней под ключ. Наличие трещин в болте устанавливается визуально или при отсутствии внешних признаков трещин методом керосиновой пробы (капиллярный метод выявления трещин). При наличии оборванных болтов, более одного, производится поочередная замена всех болтов [4].

Нагрузки, воздействующие на болтовые соединения, формируются под действием различных факторов. Вертикальные (осевые) усилия обусловлены массой перемещаемого груза и собственным весом металлической конструкции крана. Дополнительно на болт действует осевая растягивающая сила, возникающая при его затяжке с заданным моментом. При этом осевые нагрузки, связанные с весом крана и груза, создают усилия на сжатие резьбовой части, которые компенсируются предварительным растяжением болта. Горизонтальные (срезающие, поперечные по отношению к оси болта) нагрузки возникают в теле болта при повороте стрелы крана. Эти усилия вызывают напряжения в резьбовом элементе: либо на срез – при установке болта в отверстие без зазора, либо на растяжение – при необходимости обеспечить достаточную силу трения между сопрягаемыми поверхностями планшайбы опорно-поворотного устройства, чтобы предотвратить смещение под действием поперечной силы. Изгибающий момент в продольной плоскости болта формируется под действием моментной нагрузки, которая определяется как произведение массы груза на расстояние его перемещения вдоль стрелы крана. Это приводит к раскрытию стыка между элементами ОПУ и, как следствие, к изгибу болта. В таких условиях происходит перераспределение нагрузок, изменение усилия предварительной затяжки и нарушение работоспособности крепежного узла. С учетом разнообразия силовых воздействий на резьбовые соединения применяются различные методы прочностного расчета болтов. При проектировании диаметра резьбы необходимо учитывать тип нагружения и способ установки болта, поскольку даже при одинаковых механических характеристиках материала расчетные диаметры могут существенно различаться.

В качестве примера можно рассмотреть расчет одного из 48 болтов, установленных в опорно-поворотном устройстве крана грузоподъемностью 12,5 т. При этом вылет стрелы варьируется от 10 до 20 м, высота подъема крюка достигает 33 м, а расстояние от оси вращения до центра масс в горизонтальной плоскости изменяется в пределах от 5,75 до 13,4 м. Для расчета воспользуемся следующим алгоритмом [5].

Предположим, что болт установлен в отверстие с зазором (рис. 2а). В этом случае болт затягивается такой силой затяжки, чтобы возникающая на контактирующих поверхностях сила трения была больше внешней поперечной силы. Сила затяжки определяется в зависимости от количества стыков соединяемых деталей:

$$F_3 = F / (i \cdot f), \quad (1)$$

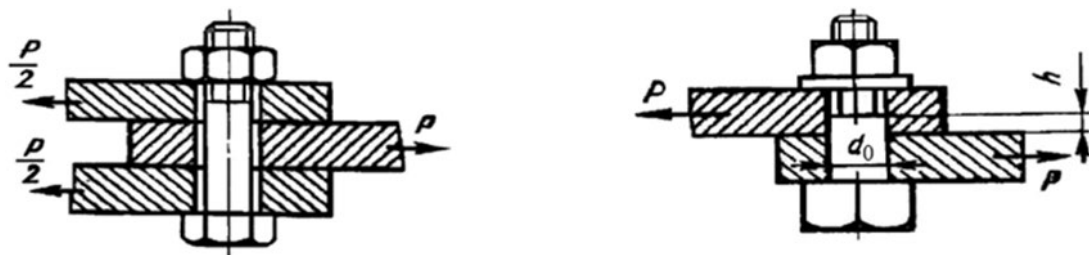
где F – поперечная сила;
 i – число стыков соединяемых деталей;
 f – коэффициент трения.

Проектный расчет внутреннего диаметра резьбы болта ведут, учитывая наименьшую площадь и наличие концентрации напряжений в этом сечении, по формуле:

$$d_1 = 1,4 \sqrt{F_3 / [\sigma_p]}, \quad (2)$$

где d_1 – внутренний диаметр резьбы, по которому может произойти ее разрушение;
 $[\sigma_p]$ – допустимое напряжение на растяжение (фланцевые поверхности сжимаются при затяжке резьбы, а сама резьба растягивается).

Для учета возникновения касательных напряжений от крутящего момента при затяжке болта расчет внутреннего диаметра болта для такого случая его установки ведут с 20 %-ным запасом.



a – болт установлен с зазором *b* – болт установлен без зазора
p – поперечная сила; *d*₀ – диаметр ненарезанной части болта; *h* – длина сжимаемой части стержня

Рисунок 2. – Вид болтового соединения

Рассмотрим случай, когда болт установлен в отверстие без зазора (рис. 2*б*) и используются прецизионные болты, называемые «призонными» или «чистыми». Стержень болта работает на срез, воспринимая поперечные силы ненарезанной частью. Резьбовая часть с навинченной на нее гайкой обеспечивает неразборность соединения, момент затяжки имеет гораздо меньшее значение по сравнению со случаем, когда болт установлен с зазором. Пакет скрепляемых болтом фланцевых деталей должен быть просверлен по месту сборки за один проход, чтобы обеспечить высокую точность центрирования деталей. Калиброванный болт устанавливают в отверстие «из-под развертки», т.е. обработанное дополнительно с использованием финишной операции. Условие прочности при срезающей нагрузке:

$$\tau = \frac{F}{\pi(d_0/2)^2} \leq [\tau_{ср}], \tag{3}$$

где τ – касательное напряжение;
 $[\tau_{ср}]$ – допустимое напряжение на срез.

Проектный расчет диаметра ненарезанной части болта производят по формуле:

$$d_0 = 1,13\sqrt{F/[\tau_{ср}]}. \tag{4}$$

Теперь обратимся к случаю, когда предварительно затянутый болт дополнительно нагружен внешней осевой растягивающей силой. Растягивающая сила F_p , действующая на болт после предварительной затяжки и приложения внешней силы, равна:

$$F_p = 1,3F_{пз} + \lambda F \quad \text{или} \quad F_p = [1,3k(1-\lambda) + \lambda]F, \tag{4}$$

где $F_{пз}$ – сила предварительной затяжки болта;

λ – коэффициент внешней нагрузки, учитывающий долю приходящейся на болт внешней нагрузки (при отсутствии упругих прокладок $\lambda = 0,2...0,3$, а при их наличии λ принимает более высокие значения, примерно до 1);

k – коэффициент затяжки болта, учитывающий силу его предварительной затяжки $F_{пз}$ (в соединениях без прокладок при постоянной внешней нагрузке $k = 1,25...2$, а при переменной – $k = 2...4$; при условиях герметичности $k \approx 5$ и выше).

Проектный расчет внутреннего диаметра резьбы болта проводят по формуле:

$$d_2 = 1,13\sqrt{F_p/[\sigma_p]}. \tag{5}$$

Проектные размеры диаметра болта, рассчитанные для разных случаев нагружения, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Диаметры болтов

Способ установки болта в соответствии с нагрузками	Болт установлен с зазором, нагружен поперечной силой	Болт установлен без зазора, нагружен поперечной силой	Болт после затяжки нагружен осевой силой
Проектный диаметр (стандартная резьба)	d_1 : M16	d_0 : M8	d_2 : M18

В рассматриваемом ОПУ используются болты высокопрочные, изготовленные из стали 40Х с номинальным диаметром резьбы 30 мм. Если в приведенных выше примерах расчетов использовать коэффициент запаса прочности $k_{пр} = 1,5...2,5$, то проектный диаметр также равен 30 мм. Диаметр был определен с учетом распределения нагрузок на 48 болтовых соединений, удерживающих ОПУ. За счет моментной нагрузки – изгибающий момент от стрелы с грузом – половина болтов оказывается нагружена растягивающей силой, а другая половина, расположенная оппозитно относительно первой, нагружена сжимающей осевой силой, т.е. вся растягивающая нагрузка воспринимается 24 резьбовыми соединениями (вместо 48). При этом в зависимости от угла поворота фланца каждый болт периодически испытывает растяжение или сжатие.

Следует отметить, что анализ нагрузок, возникающих в болтовом соединении ОПУ, проведенный в данной статье, совпадает с результатами рассмотрения «жизненного цикла» болта профессором А.В. Чигаревым, приведенного в работе [6].

При контролируемой затяжке гайки нормальной точности силы сжатия пакета фланцев болтами, а следовательно, и развивающиеся силы трения на стыках при действии сдвигающих сил неопределенны и в большинстве случаев недостаточны для полного восприятия этих сдвигающих сил. Авторы статьи [6] предлагают разбить работу такого соединения на четыре этапа.

Этап 1. Болты работают на растяжение в пределах зоны упругости. Растягивающие нагрузки и нормальные напряжения в теле болта созданы моментом затяжки. Силы трения в соединяемых плоскостях фланцев достаточны для сопротивления поперечным силам.

Этап 2. Увеличение внешней поперечной сдвигающей силы (больше силы трения в стыках) приводит к сдвигу фланцев на величину зазора между болтом и отверстием.

Этап 3. Усилие сдвига поверхностей фланцевого соединения приводит к появлению изгибающего момента в продольном сечении болта. Так как болт ограничен головкой, отверстием и гайкой, сдвигающие усилия приводят к смятию.

Этап 4. На этом этапе наступает упругопластическая работа соединения. Силы трения уже не выдерживают поперечную нагрузку, из-за смятия резьбы и отверстия соединения «разбалтывается», может произойти срез болта, отрыв его головки, смятие соединяемых поверхностей, их выкол. Все это приводит к разрушению болтового соединения. Что касается многоболтового соединения, то в нем добавляется еще неравномерность нагружения элементов в зависимости от расположения по фланцу.

При таком сложном и изменяющемся нагруженном состоянии прогнозировать работоспособность болтов по критерию прочности на основе аналитических расчетов достаточно сложно. Натурные испытания конструкций с болтовыми соединениями – мероприятие дорогостоящее, при этом не представляется возможным учесть действие всех факторов, влияющих на состояние узла, кроме функциональных нагрузок, поэтому моделированию уделяют большое внимание. Компьютерный вычислительный эксперимент позволяет получить данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) как единичного болта, поставленного во фланцевое соединение, так и о распределении напряжений в болтах, одновременно участвующих в восприятии и передаче нагрузок.

Выполнен численный эксперимент по моделированию поведения болтовых соединений в опорно-поворотном устройстве подъемного крана с использованием программы ANSYS, в том числе имитирующий отрыв нескольких болтов.

Для моделирования объемных твердых тел ANSYS Workbench по умолчанию использует 3D-элементы типов SOLID 187 и BEAM 188. Конечный элемент SOLID 187 представляет собой трехмерный объемный напряженно-деформированный элемент с десятью узлами в форме тетраэдра, каждый из которых имеет три степени свободы – три смещения вдоль осей узловой системы координат. Конечный элемент BEAM 188 представляет собой одномерный балочный конечный элемент. Это двухузловой конечный элемент с линейной, квадратичной или кубической аппроксимацией. Каждый узел имеет шесть степеней свободы: три смещения в направлениях x , y , z и три угла поворота вокруг осей Ox , Oy , Oz . Элементы SOLID 187 и BEAM 188 могут использоваться как в линейных, так и в нелинейных задачах с большими деформациями [7]. Конечные элементы имеют произвольную ориентацию в пространстве и обладают свойствами пластичности, ползучести, гиперупругости, изменения жесткости под действием нагрузок.

Исследуемая конечно-элементная модель принята в виде тетраэдров и состоит из 68 062 конечных элементов двух основных типов: SOLID 187 (трехмерный объемный элемент НДС с десятью узлами в форме тетраэдра) и BEAM 188 (одномерный балочный конечный элемент), средний габаритный размер элемента составил 1 мм, открытого профиля – 5 мм (рис. 3).

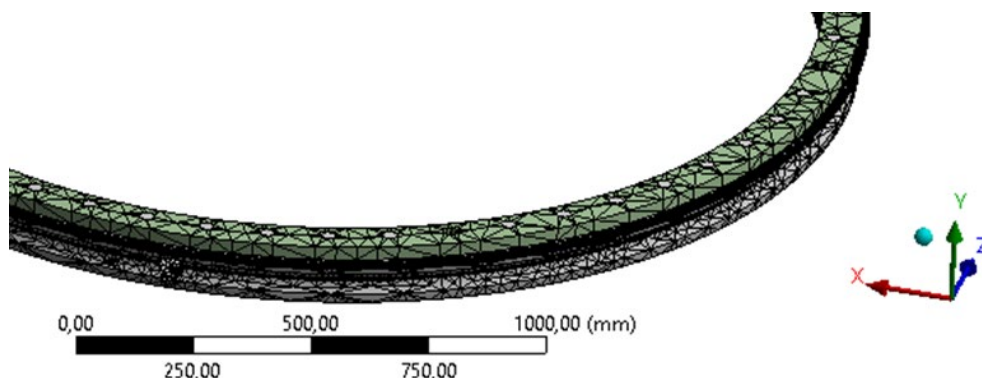


Рисунок 3. – Фрагмент модели опорно-поворотного устройства с нанесенной конечно-элементной сеткой

Кран, предназначенный для строительства 9–10-этажных зданий, имеет следующие характеристики: вылет стрелы – от 10 до 20 м, высота подъема крюка – до 33 м, грузоподъемность 12,5 т, расстояние от оси вращения крана до центра масс в горизонтальной плоскости изменяется от 5,75 до 13,4 м. Для моделирования приложения дистанционной силы и равновесия между силой и моментом мы используем инструмент Remote Force.

Для принятой конечно-элементной модели выполнен расчет статической прочности для каждого болтового соединения. Исследовано НДС болта под действием осевой нагрузки, поперечной силы и изгибающего момента. При сложении всех видов нагрузок стержень болта испытывает самые большие напряжения; отмечаются даже красные области, в которых напряжения сопоставимы с допустимым напряжением – пределом прочности на растяжение. Такое напряженное состояние присуще 3-му этапу жизненного цикла, когда сдвиг поверхностей фланцев приводит к появлению изгибающего момента в продольном сечении болта. На рисунке 4 показано НДС отдельного болта под действием описанных выше нагрузок. На рисунке 5 приведено НДС части ОПУ и болта, установленного во фланцевом соединении. В этом случае большие напряжения, возникающие во фланцах, приводят и к дополнительным нагрузкам на тело болта.

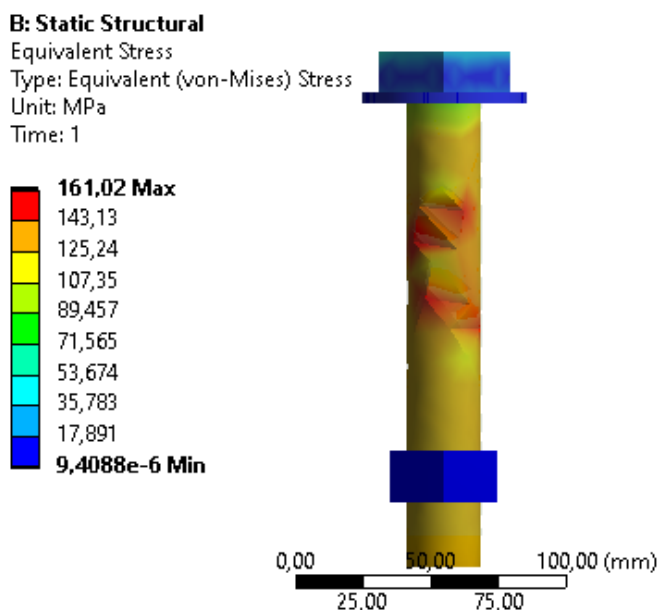


Рисунок 4. – Схема распределения эквивалентных напряжений болта под действием осевой нагрузки, поперечной силы и изгибающего момента

Проведено моделирование отрыва (удаления) наиболее нагруженных болтов, подверженных наибольшей растягивающей и изгибающей нагрузке, расположенных оппозитно направлению стрелы крана (при построении модели всем крепежным узлам ОПУ присвоены порядковые номера). По итогу первой итерации моделирования наиболее нагруженным оказался болт № 37 (табл. 2). Далее этот болт был удален из модели и проведена следующая итерация расчета наиболее нагруженного болта. В результате были последовательно удалены болты № 37, 40, 42, 39, 38 и 43. После удаления пяти болтов в шестом, наиболее нагруженном болте, регистрировали превышение нагрузки до допустимого значения напряжения на растяжение. На рисунке 6 изображен график увеличения нагрузки на следующий за удаленным болт при удалении от одного до шести болтов.

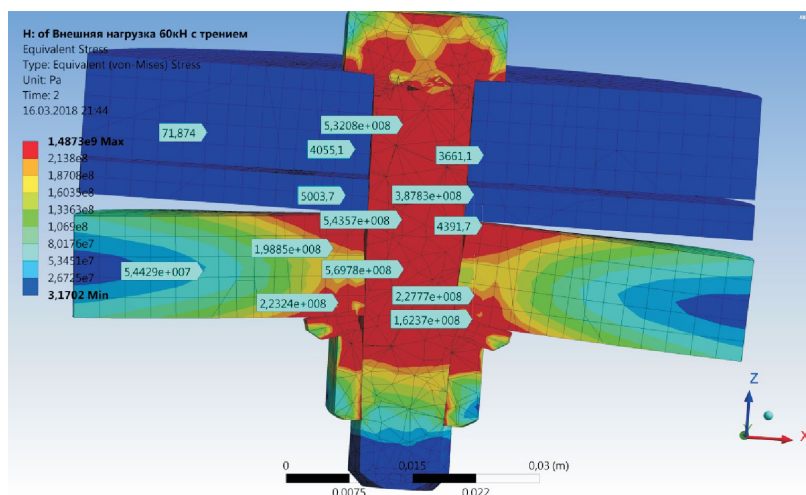


Рисунок 5. – Напряженно-деформированное состояние болта, гайки и соединяемых фланцев [8]

Таблица 2. – Фрагмент расчета осевых сил в теле болта (первая итерация с болтом № 37)

Болтовое соединение	Осевая сила, Н	Изгибающий момент, Н·мм
Beam Probe 37	84998	2,6481e-010
Beam Probe 44	84707	-2,3971e-010
Beam Probe 46	77982	-3,9784e-012
Beam Probe 35	77395	2,8163e-012
Beam Probe 38	67879	3,5958e-010
Beam Probe 43	67461	1,2241e-010
Beam Probe 42	62545	4,2801e-011
Beam Probe 40	62054	4,7692e-011
Beam Probe 39	62036	8,3113e-012
Beam Probe 41	61759	-1,1414e-011
Beam Probe 34	53631	8,2607e-012
Beam Probe 47	53480	-8,433e-012
Beam Probe 48	41246	-1,1318e-010
Beam Probe 33	41182	1,0832e-010
Beam Probe 32	35024	-1,8548e-011
Beam Probe 49	34663	1,6844e-011
Beam Probe 50	29641	-4,0003e-010
Beam Probe 31	29464	3,8453e-010
Beam Probe 51	23598	5,6559e-011
Beam Probe 30	23538	-5,6105e-011
Beam Probe 29	17104	-3,9207e-010
Beam Probe 52	17072	5,0822e-010
Beam Probe 28	10728	-7,2933e-011
Beam Probe 53	10723	1,0612e-010
Beam Probe	-3201,3	1,099e-010
Beam Probe 26	-3218,5	3,6076e-010
Beam Probe 25	-11303	1,1063e-010
Beam Probe 2	-11401	-8,5648e-011

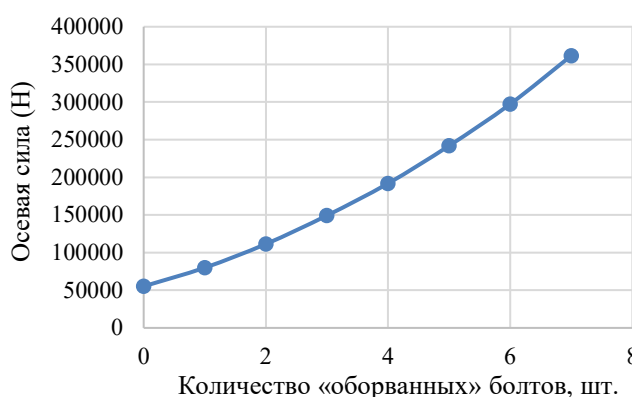


Рисунок 6 – Зависимость осевой силы от количества болтов

Не только функциональные нагрузки могут быть причиной потери работоспособности, под которой понимают (по ГОСТ Р 27.102-2021²) такое состояние объектов, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации. Имеются объективные и субъек-

тивные факторы, которые почти не поддаются учету при проектировании крепежных узлов. Конечно, действие таких факторов вбирает коэффициент запаса прочности, присутствующий в любом прочностном расчете, однако даже при этом синергетический эффект может привести к потере работоспособности соединения.

На рисунке 7 приведены факторы, влияющие на работоспособность резьбового соединения в ОПУ. При проектных расчетах принимаются определенные значения механических характеристик металла, которые в реальности могут не совпадать с детерминированными значениями, приведенными в стандарте, и находятся в определенном интервале. В самих крепежных изделиях могут присутствовать дефекты структуры, появившиеся в результате термической или механической обработки. Неточное изготовление и сборка металлоконструкции крана, имеющиеся в них дефекты металла также приводят к дополнительным неучтенным нагрузкам на резьбовые соединения ОПУ. Влияние климатических условий может отрицательно отражаться на несущей способности болтовых соединений. В качестве примера можно привести падение рекламных щитов во время урагана 2024 г.³, когда порывы

² Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения: ГОСТ Р 27.102-2021. – Взамен ГОСТ 27.002-2015; введ. 01.01.2022. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – IV, 36 с.

³ Последствия непогоды 13 июля 2024 года // Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь: офиц. сайт. – 2024. – 13 июля. – URL: <https://mchs.gov.by/glavnoe/456244/> (дата обращения 30.12.2024).

ветра достигали 20–22 м/с, что нехарактерно для нашей республики и не было учтено при расчете этих конструкций.



Рисунок 7. – Факторы, влияющие на работоспособность болтовых соединений ОПУ

Одной из главных причин аварий и инцидентов, связанных с разрушением болтовых соединений в кранах, является несвоевременное техническое обслуживание. Подтяжка болта до тарированного момента затяжки может восстановить и продлить его работоспособность (даже на 2-м и 3-м этапах жизненного цикла), а сам процесс использования (установки и завинчивания) динамометрического ключа способствует выявлению оборванных и поврежденных деталей.

В ГОСТ 32579.1-2013⁴ предложен расчет металлоконструкции крана и его деталей по комбинированным нагрузкам и приведены эксплуатационные ситуации, когда такое сочетание нагрузок возникает. Это также является реализацией системного подхода в учете многих изменяемых (как случайных, так и регулярных) параметров, от которых зависит работоспособность подъемного крана. Однако учесть влияние такого сочетанного действия нагрузок на конкретное резьбовое соединение достаточно сложно. Кроме того, частой причиной выхода из строя крепежных деталей является субъективный фактор – несвоевременное освидетельствование и техническое обслуживание узла.

Один из значимых факторов – это коррозия. Следует отметить, что расследование аварии крана, упомянутой в начале статьи, выявило следы коррозии в 30 болтах опорно-поворотного устройства. Влияние коррозии проявляется в уменьшении внутреннего диаметра резьбы, от размера которого напрямую зависят прочностные характеристики соединения, снижении коэффициента трения из-за образования рыхлой корки на контактирующих поверхностях, что способствует снижению силы затяжки (формула расчета по трению); повышению податливости витков резьбы, что также ведет к ослаблению момента затяжки, который является тарированным.

Климатические условия Республики Беларусь являются неблагоприятными для металлических конструкций, работающих на открытом воздухе, в том числе для башенных кранов. По данным Гидрометеоцентра, на территории республики осадки в виде снега и дождя

⁴ Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Часть 1. Общие положения: ГОСТ 32579.1-2013. – Введ. 01.06.2015 – М.: Стандартинформ, 2015. – 34 с.

наблюдаются в течение почти половины дней в году (145–195 дней в зависимости от региона) и, конечно, оставляют за собой повышенную влажность. Вода, попадающая в резьбовое соединение, смывает защитную смазку, а постоянная высокая влажность способствует поверхностной коррозии металла. Провоцирующим фактором может быть загрязнение воздуха углекислым газом, связанное с выбросами работающей на стройплощадке техники.

Пунктом 27 Правил по обеспечению промышленной безопасности грузоподъемных кранов (утв. постановлением МЧС от 24 мая 2021 г. № 40) установлено, что при проектировании грузоподъемных кранов, работающих на открытом воздухе, должны быть предусмотрены конструктивные решения против скопления влаги в замкнутых полостях. Металлоконструкции и металлические детали грузоподъемных кранов должны быть защищены от коррозии.

Для изучения процессов коррозии, происходящих на металлических материалах в различных коррозионных средах, проведены экспериментальные исследования в Университете гражданской защиты [9]. Исследования коррозионного воздействия проводились гравиметрическим методом. Для проведения исследований были использованы образцы из нержавеющей стали и углеродистой стали. Каждый образец погружался в накрытую крышкой прозрачную емкость на определенный временной период, что представляло собой моделирование воздействия жидкой коррозионной среды. Испытания проводили при температуре 20 ± 2 °С в течение двух месяцев. Изменение толщины плоского образца ΔL по потере массы с учетом геометрии образца определялось по формуле:

$$\Delta L = \Delta m / \rho,$$

где Δm – потеря массы на единицу площади, г/см²;
 ρ – плотность металла, г/см³.

Состояние образцов, подверженных коррозии, лучше всего оценивать по глубинному показателю коррозии K_{Π} (мм/год):

$$K_{\Pi} = \alpha \Delta L / \tau,$$

где $\alpha = 365 \cdot 24 \cdot 60$ – коэффициент пересчета времени, мин/год;

τ – продолжительность экспериментальных исследований, мин.

Например, для углеродистой стали во влажной среде этот показатель составляет 0,07 мм/год, для легированной – 0,00077 мм/год. При пересчете на внутренний диаметр резьбы болта: для болта из углеродистой стали – 0,14 мм/год; для болта, изготовленного из легированной стали, – 0,00154 мм/год. На рисунке 8 приведены зависимости напряжений в теле болта при уменьшении диаметра от коррозионных процессов по годам при усредненных нагрузках 130 и 80 кН. Из графика видно, что на пятом году при нагрузке 130 кН, что соответствует интенсивной эксплуатации крана с нагрузками, близкими к максимальным, напряжения превышают предел текучести. А коэффициент запаса прочности начинает снижаться уже после года эксплуатации (без учета профилактических мер защиты от коррозии).

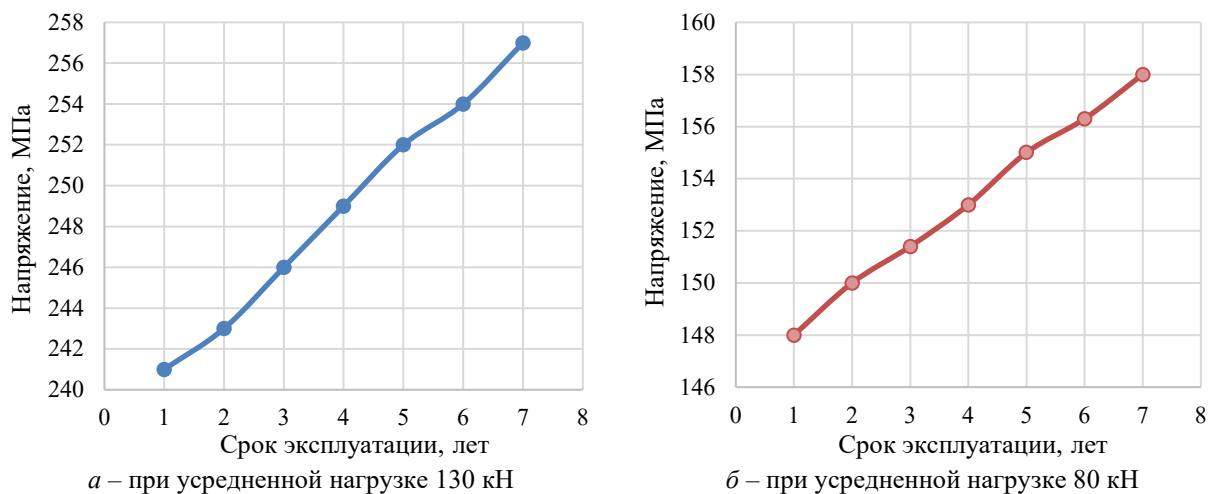


Рисунок 8. – Зависимость нормальных напряжений в теле болта (Ст. 3) от срока эксплуатации

Для легированной стали 40Х, из которой изготавливают высокопрочные болты для кранов, во влажной среде такие критические значения напряжений, связанные с уменьшением внутреннего диаметра резьбы от коррозии, не возникают (рис. 9). Но часто влажная среда, в которой работают болтовые соединения, имеет кислотные или щелочные добавки, например от выбросов техники и механизмов, работающих на стройке, от промышленных предприятий, окружающих стройку. Так, по данным работы [10], показатель глубинной коррозии для легированной стали в кислых средах увеличивается в полтора раза по сравнению с воздействием нейтральной водопроводной или атмосферной воды.

Однако для нержавеющей сталей опасной является местная электрохимическая коррозия, называемая «щелевой». Этот вид коррозии происходит в трещинах и зазорах, т.е. во фланцевых, резьбовых соединениях, в местах прилегания металла к прокладочным материалам. Щелевая коррозия протекает в зазорах, где скапливается и задерживается влага, т.е. на открытом воздухе при контакте с атмосферой и высокой влажности. Среди особенностей щелевой коррозии то, что она развивается даже в отсутствие основного окислителя, провоцирующего процесс, – кислорода или в условиях его малого количества, когда его поступление в узкую щель затруднено.

Самыми чувствительными к щелевой коррозии считают хромистые и хромоникелевые сплавы. Металл болтовых соединений ОПУ как раз входит в эту группу – высокопрочные болты изготавливают из стали 40Х, которая содержит около 1,1 % хрома в качестве легирующей добавки и до 0,5 % никеля в качестве примеси. Особенно стремительно щелевая коррозия развивается при застое влаги и повышении температуры [11].

Для того чтобы избежать щелевой коррозии, рекомендуют не применять конструкции деталей и узлов, где есть значительные зазоры, применять сварные соединения. Однако для ОПУ применение сварных швов невозможно, во-первых, из-за их высокой жесткости, во-вторых – из-за необходимости разборки крана при переводе его на другую строительную площадку. Остаются методы защиты щелей и зазоров в стыках, т.е. использование смазок, прокладок, уплотнителей из полимеров, фторопластов и т.д. с учетом их механической и химической стойкости. Для контроля над коррозионными процессами могут применяться ингибиторные материалы, которые не только предупреждают появление коррозии, но и уменьшают или блокируют развитие уже появившейся.

Для контроля текущего состояния болтов в ОПУ при эксплуатации можно предложить измерение остаточных напряжений в теле болта с помощью роботизированного рентгеновского дифрактометра неразрушающего контроля StressX, используемого в Институте прикладной физики НАНБ для выявления остаточных напряжений в ответственных деталях после литья, механообработки, термообработки и т.д. При этом напряжение от установленного момента затяжки болта может быть рассчитано теоретически или определено экспериментально. Сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента позволит определить диапазон напряжений в материале, обеспечивающий работоспособность крепежного соединения. С одной стороны, достаточно ли затянут болт, чтобы противостоять поперечным силам и изгибающим моментам; с другой – не подходят ли значения действующих напряжений близко к допустимым, а следовательно, к утрате работоспособности соединения.

Заключение

Подъемные краны традиционно являются важнейшей частью строительной техники. Несмотря на постоянное совершенствование их конструкций, внедрение более прочных и износостойких материалов, а также развитие методов диагностики состояния элементов и соединений, ключевые проблемы эксплуатации по-прежнему связаны с человеческим фактором. Наиболее частой причиной аварий и инцидентов остается несоблюдение сроков и ре-

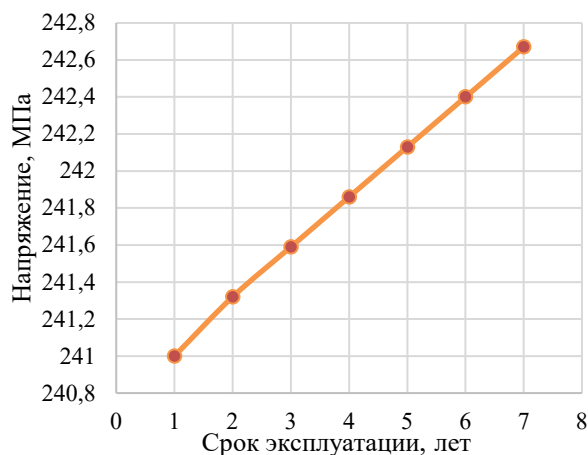


Рисунок 9. – Зависимость нормальных напряжений в теле болта (Ст. 40Х) при усредненной нагрузке 130 кН

гламентов технического обслуживания. Особое внимание следует уделить болтовым соединениям, особенно в узлах ОПУ. Помимо визуального контроля целостности болтов, наличия стопорящих элементов и признаков коррозии, критически важным показателем их работоспособности является соответствие момента затяжки значениям, установленным заводом-изготовителем. Этот параметр контролируется с помощью динамометрического ключа, который не всегда доступен и может быть неправильно откалиброван. В фрикционных соединениях прочность обеспечивается силой трения между сопрягаемыми поверхностями, возникающей при затягивании резьбы. При эксплуатации крана болты подвергаются воздействию крутящего момента в горизонтальной плоскости (при повороте ОПУ) и переменным изгибающим нагрузкам в вертикальной плоскости (при подъеме и опускании груза), что приводит к деформации опорных поверхностей и отверстий во фланцах. Поэтому точность затяжки болтов в соответствии с расчетными значениями имеет решающее значение. Обрыв одного или нескольких болтов ОПУ представляет собой аварийную ситуацию. Моделирование в программной среде ANSYS показало, что при выходе из строя части болтов нагрузка перераспределяется на соседние соединения, вызывая в них напряжения, превышающие расчетные. Это ускоряет переход соединения к стадии отказа. Одним из эффективных профилактических мероприятий может служить принудительная замена всех болтов на новые с соблюдением тарированного момента затяжки. Даже при наличии повреждений посадочных отверстий и деформации краев фланцев это позволяет условно «перезапустить» жизненный цикл соединения и существенно снизить риск разрушения. Несмотря на немалую стоимость такой процедуры, она обеспечивает высокий уровень надежности.

На сегодня невозможно предложить принципиально новые решения для снижения аварийности подъемных кранов. В связи с этим особое внимание следует уделить соблюдению рекомендаций Госпромнадзора, направленных на обеспечение промышленной безопасности грузоподъемной техники. Ключевыми мерами остаются соблюдение периодичности и объема технического обслуживания, своевременная замена высокопрочного крепежа согласно эксплуатационной документации производителей, фиксация выполненных работ в отчетной документации, а также наличие специализированного инструмента для контроля момента затяжки болтовых соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сенкевич, Е.И. Рекомендации по выявлению дефектов, возникающих при эксплуатации грузоподъемных кранов. Причины дефектов, порядок их устранения / Е.И. Сенкевич // Промышленная безопасность. – 2024. – № 8 (313). – С. 23–28.
2. Ситько, А.Н. О безопасной эксплуатации кранового оборудования на стройплощадках / А.Н. Ситько // Охрана труда в Беларуси: [сайт]. – 2016. – 11 янв. – URL: <https://otb.by/3928-o-bezopasnoi-ekspluatatsii-kranovogo-oborudovaniia-na-stroiploshchadkakh> (дата обращения 30.12.2024).
3. Анцев, В.Ю. Классификация дефектов и отказов грузоподъемных машин / В.Ю. Анцев, П.В. Витчук, К.Ю. Крылов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 10. – С. 121–128. – EDN: VKIBSB.
4. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 3. Башенные, стреловые несамостоятельные и мачтовые краны, краны-лесопогрузчики: РД10-112-3-97. – В дополнение к РД 10-112-96 ч. 1; введ. 01.01.1998. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2009. – 44 с. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294848/4294848598.htm> (дата обращения 30.12.2024).
5. Смиловенко, О.О. Техническая механика: учебник / О.О. Смиловенко, Т.М. Мартыненко, С.А. Лосик. – Мн.: РИВШ, 2021. – 520 с. – ISBN: 9789855865132.
6. Чигарев, А.В. Применение конечно-элементного пакета ANSYS для расчета болтовых соединений / А.В. Чигарев, М.В. Ручан, Т.В. Шукевич // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов: по материалам Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении», 6–10 апр. 2009 г. / Белорусский национальный технический университет; под ред. Б.М. Хрусталева. – Мн., 2010. – Вып. 25. – С. 231–236.
7. Мартыненко, Т.М. Компьютерное моделирование разрушения болтового соединения опорно-поворотного устройства подъемного крана / Т.М. Мартыненко, О.О. Смиловенко, И.М. Мартыненко, С.А. Лосик // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2023. – № 2 (54). – С. 24–31. – DOI: 10.54422/1994-439X.2023.2-54.24-31. – EDN: LYBKPZ.
8. Каратушин, С.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений в среде ANSYS / С.И. Каратушин, Д.А. Храмова, П.Н. Бокучава // Известия высших учебных

- заведений. Машиностроение. – 2018. – № 8 (701). – С. 11–18. – DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-11-18. – EDN: LZAUXZ.
9. Казутин, Е.Г. Экспериментальная оценка повреждаемости элементов резервуаров пожарных автоцистерн в жидких коррозионных средах / Е.Г. Казутин, О.В. Рева, В.Б. Альгин // Актуальные вопросы машиноведения. – 2016. – Т. 5. – С. 250–257. – EDN: YRHOQB.
 10. Звягинцева, А.В. Воздействие состава природной воды на коррозионную стойкость стали 40Х магистральных трубопроводов / А.В. Звягинцева, А.С. Тенькаева, Н.В. Мозговой // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 5. – С. 276–282. – EDN: VBYNMN.
 11. Щелевая коррозия металла // Точинвест Цинк: [сайт]. – 2020. – 6 сент. – URL: <https://t-zinc.ru/o-kompanii/stati/shhelevaya-korroziya-metalla.html> (дата обращения 30.12.2024).

**Работоспособность болтовых соединений в крепежных узлах
опорно-поворотного устройства подъемных кранов**
Bolting operability in fasteners of tilting support device cranes

Смиловенко Ольга Олеговна

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности, профессор
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: olgasmilovenko@gmail.com

Olga O. Smilovenko

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 Industrial Safety, Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: olgasmilovenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1612-9573

Мартыненко Тарас Михайлович

кандидат физико-математических наук,
доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности, доцент
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: taras2480@gmail.com
SPIN-код: 4999-4213

Taras M. Martynenko

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety, Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: taras2480@gmail.com
ORCID: 0009-0000-6609-2030

Лосик Сергей Анатольевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности,
старший преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: losikserg@mail.ru
SPIN-код: 3355-0668

Sergey A. Losik

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety,
Senior Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: losikserg@mail.ru
ORCID: 0009-0002-2501-9026

Полуян Александр Иванович

Государственное научное учреждение
«Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси»,
лаборатория сверхпрочных материалов,
научный сотрудник
Адрес: ул. Академическая, 12,
220072, г. Минск, Беларусь
Email: APoluyn.1954@tut.by
SPIN-код: 1244-9283

Aleksandr I. Poluyan

Joint Institute of Mechanical Engineering
of the National Academy of Sciences of Belarus,
Laboratory of Superstrong Materials,
Researcher
Address: Akademicheskaya str., 12,
220072, Minsk, Belarus
Email: APoluyn.1954@tut.by
ORCID: 0009-0005-9276-8870

Казутин Евгений Геннадьевич

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной техники, профессор

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

Email: EKazutin@tut.by

SPIN-код: 8141-8851

Evgeniy G. Kazutin

PhD in Technical Sciences

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

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

Email: EKazutin@tut.by

ORCID: 0009-0008-1498-6284

BOLTING OPERABILITY IN FASTENERS OF TILTING SUPPORT DEVICE CRANES

Smilovenko O.O., Martynenko T.M., Losik S.A., Poluyan A.I., Kazutin E.G.

Purpose. Improving the operability of bolted connections of support and turning devices of cranes by early detection of defects based on a system analysis of factors (causes) affecting the failure of fasteners.

Methods. Analysis of the results of theoretical and experimental studies of the reliability of fasteners of flange connections, taking into account dynamic loads; modeling of the process of loss of functional capability of a bolted connection taking into account load redistribution.

Findings. The main reasons for the failure of bolt assemblies of lifting cranes in the form of non-cyclic dynamics of functional loads, combined impact of various types of loading, which is not taken into account in the design calculation of the thread diameter, as well as the direct influence of subjective factors, have been identified. The recommendations are formulated on the control of bolt connections (in accordance with the Rules for ensuring the industrial safety of lifting cranes), which substantiate and specify the operations for checking: tightening torque, the presence of defects (cracks) in the bolt body, surface areas affected by corrosion.

Application field of research. Installation and operation of lifting cranes equipped with a flange-type rotary support device with bolting.

Keywords: crane, rotary support device, bolting, loss of operability, ANSYS simulation, tightening torque, corrosion.

(The date of submitting: July 31, 2025)

REFERENCES

1. Senkevich E.I. Rekomendatsii po vyyavleniyu defektov, voznikayushchikh pri ekspluatatsii gruzopod"emnykh kranov. Prichiny defektov, poryadok ikh ustraneniya [Recommendations for identifying defects arising during the operation of lifting cranes. Causes of defects, procedure for their elimination]. *Promyshlennaya bezopasnost'*. 2024. No. 8 (313). Pp. 23–28. (rus)
2. Sit'ko A.N. O bezopasnoy ekspluatatsii kranovogo oborudovaniya na stroyploshchadkakh [On the safe operation of crane equipment at construction sites]. *Okhrana truda v Belarusi* [Labor safety and health in Belarus]: website. January 11, 2016. (rus). URL: <https://otb.by/3928-o-bezopasnoi-ekspluatatsii-kranovogo-oborudovaniia-na-stroyploshchadkakh> (accessed: December 30, 2024).
3. Antsev V. Yu., Vitchuk P. V., Krylov K. Yu. Klassifikatsiya defektov i otkazov gruzopod"emnykh mashin [Classification of defects and failures of load-lifting machines]. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2015. No 10. Pp. 121–128. EDN: VKIBSB.
4. Metodicheskie ukazaniya po obsledovaniyu gruzopod"emnykh mashin s istekshim srokom sluzhby. Chast' 3. Bashennye, strelovye nesamokhodnye i machtovye krany, krany-lesopogruzchiki [Guidelines for the inspection of lifting equipment with expired service life. Part 3. Tower cranes, boom cranes, non-self-propelled cranes, mast cranes, and timber cranes]: RD10-112-3-97. In addition to RD 10-112-96 Part 1; introduced January 1, 1998. Moscow, 2009. 44 p. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294848/4294848598.htm> (accessed: December 30, 2024).
5. Smilovenko O.O., Martynenko T.M., Losik S.A. *Tekhnicheskaya mekhanika* [Technical mechanics]: textbook. Minsk: National Institute for Higher Education, 2021. 520 p. (rus)
6. Chigarev A.V., Ruchan M.V., Shukevich T.V. Primenenie konechno-elementnogo paketa ANSYS dlya rascheta boltovykh soedineniy [Application of the ANSYS finite-element package for calculating bolt connections]. *Mashinostroenie: republican interdepartmental collection of scientific papers: based on the materials of the Intern. scientific and technical conf. «Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii v mashinostroenii» Minsk, April 6–10, 2009.* Belarusian National Technical University. Ed. by: B.M. Khrustalev. Minsk, 2010. Pp. 231–236. (rus)
7. Martynenko T.M., Smilovenko O.O., Martynenko I.M., Losik S.A. Komp'yuternoe modelirovanie razrusheniya boltovogo soedineniya oporno-povorotnogo ustroystva pod"emnogo krana [Computer modeling of the destruction of the bolt connection of the support-turning device of the crane]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2023. No. 2 (54). Pp. 24–31. (rus). DOI: 10.54422/1994-439X.2023.2-54.24-31. EDN: LYBKPZ.
8. Karatushin S.I., Khranova D.A., Bokuchava P.N. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya boltovykh soedineniy v srede ANSYS [Simulation of the stress-strain state of bolted connections in ANSYS] *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2018. No. 8(701). Pp. 11–18. (rus). DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-11-18. EDN: LZAUXZ.

9. Kazutin E.G., Reva O.V., Algin V.B. Eksperimental'naya otsenka povrezhdaemosti elementov rezervuarov pozharnykh avtotsistern v zhidkikh korrozionnykh sredakh [Experimental assessment of damage to elements of the tanks of fire tankers in liquid corrosive environments]. *Topical Issues of Mechanical Engineering*, 2016. Vol. 5. Pp. 250–257. (rus). EDN: YRHOQB.
10. Zvyagintseva A.V., Ten'kaeva A.S., Mozgovoy N.V. Vozdeystvie sostava prirodnoy vody na korrozionnyuyu stoykost' stali 40Kh magistral'nykh truboprovodov [Impact of natural water composition on corrosion resistance 40X steel of the main]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2015. Vol. 17, No. 5. Pp. 276–282. (rus). EDN: VBYNMN.
11. Shchelevaya korroziya metalla [Crevice corrosion of metal]. *Tochinvest Zink*: website. September 6, 2020. URL: <https://t-zinc.ru/o-kompanii/stati/shchelevaya-korroziya-metalla.html> (accessed: December 30, 2024).

Copyright © 2026 Smilovenko O.O., Martynenko T.M.,
Losik S.A., Poluyan A.I., Kazutin E.G.

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

ЭМОЦИОНАЛЬНОЕ ВЫГОРАНИЕ СПАСАТЕЛЕЙ-ПОЖАРНЫХ

Тарасевич Т.Н.

Цель. Проведение анализа теоретико-методологических подходов к исследованию проблемы профессионального здоровья личности в целях введения самостоятельного определения «профессиональное здоровье личности». Проведение эмпирического исследования профессионального здоровья работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям посредством индикатора эмоционального выгорания.

Методы. Анализ теоретико-методологических подходов отечественных и зарубежных ученых в исследовании проблемы профессионального здоровья человека. Для исследования уровня эмоционального выгорания, как составляющей профессионального здоровья работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям, использована методика А.В. Бойко «Эмоциональное выгорание».

Результаты. Дано определение профессионального здоровья личности как интегративный показатель состояния физического и психического здоровья личности, характеризующий ее способность сохранять защитные механизмы организма на протяжении профессиональной жизни в целях достижения высоких результатов труда в условиях определенной трудовой деятельности. Исследован уровень эмоционального выгорания, как составляющей профессионального здоровья работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям. Фазы эмоционального выгорания «напряжение», «резистенция», «истощение» не сформированы у 80, 67 и 87 % работников соответственно. Низкие показатели уровня эмоционального выгорания либо их отсутствие свидетельствуют об удовлетворенности работниками условиями труда, о хороших взаимоотношениях с коллегами, подчиненными, руководством. Работники органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям обладают устойчивыми навыками саморегуляции и механизмами психологической защиты, что указывает на высокую профессиональную надежность и профессиональное здоровье специалистов.

Область применения исследований. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения методики А.В. Бойко в целях своевременного выявления повышения уровня эмоционального выгорания и последующей коррекции психологического состояния, развития эмоциональной устойчивости работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям для поддержания их профессионального здоровья на высоком уровне.

Ключевые слова: профессиональное здоровье личности, работники органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям.

(Поступила в редакцию 3 декабря 2025 г.)

Введение

Профессиональное здоровье личности человека в условиях постоянно изменяющегося современного мира и рынка труда является одной из важнейших составляющих эффективности деятельности организаций и поддержания их конкурентоспособности. Профессиональное здоровье специалиста включает не только его личностные характеристики, умения и навыки, но и сложные процессы взаимосвязей как в профессиональной среде предприятия, так и в обществе. В рамках имеющейся концепции по поддержанию профессионального здоровья личности органическая корреляция между специалистом и обществом позволит сохранить безопасность профессиональной деятельности, повысить ее эффективность и обеспечить профессиональное долголетие работника.

Концепция профессионального здоровья личности имеет гуманистический характер и направлена на обеспечение безопасности и надежности профессиональной деятельности, повышение ее эффективности, обеспечение профессионального долголетия. Актуальность данной работы обусловлена изучением психологического здоровья специалистов органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям, непосредственно принимающих участие в ликвидации чрезвычайных ситуаций, посредством эмпирического исследования процессов

эмоционального выгорания в соответствии с методикой А.В. Бойко. На всем протяжении профессионального пути специалисты сталкиваются с различными факторами опасности, профессиональные риски увеличиваются с каждым годом. Высокий уровень различных природных составляющих условий в виде экстремальных температур, наличия повышенной концентрации химических опасных веществ, повышенный уровень травматизма оказывают значительное влияние на физиологическое состояние здоровья человека. Стоит отметить, что психологическое воздействие на специалистов данной профессии также находится на высоком уровне. Работники органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям осуществляют взаимодействие с различными категориями граждан в стрессовых и кризисных ситуациях: при получении травм, гибели близких, в моменты паники, безысходности, травмы потери, которые оказывают сильное воздействие на психологическое состояние работников. Таким образом, поддержание профессионального здоровья работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям посредством профессионального сопровождения является актуальным вопросом, который связан с преодолением профессиональных рисков через навыки саморегуляции. Вместе с тем создание безопасных условий профессиональной деятельности, создание здоровых рабочих мест, повышение уровня эффективности служебной деятельности, качества профессиональной жизни являются основными условиями обеспечения профессионального долголетия.

Целью данной работы является анализ теоретико-методологических подходов к исследованию проблем профессионального здоровья личности, проведение эмпирического исследования уровня эмоционального выгорания работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям как одной из составляющих профессионального здоровья человека. Это позволит выделить перспективные направления развития данной области, разработать и внедрить практические инструменты по обеспечению профессионального здоровья работников, входящих в группы «профессионального риска», увеличить профессиональное долголетие специалистов помогающих профессий.

Исследование профессионального здоровья человека включает сферы психологии здоровья и психологии труда. Психология здоровья рассматривает причины нездоровья человека, предлагает средства и методы его сохранения, укрепления и развития. Психология труда включает систематизированные психологические знания о труде и человеке как субъекте, который занимается определенным видом трудовой деятельности.

Основная часть

В рамках психологии труда здоровье включает следующие компоненты:

- эффективность труда (результат трудовой деятельности, ресурсов, которые были затрачены для достижения цели);
- качество труда (является составляющей характеристикой полученных результатов по отношению к затраченным ресурсам и усилиям человека, которые необходимы для достижения цели);
- профессиональное самосохранение (личная ответственность человека за свое состояние, здоровье, способность к саморегуляции);
- профессиональная компетентность или профессионализм (наличие у специалиста профессиональных знаний, умений и навыков, которые обеспечивают рациональное планирование и организацию труда, владение навыками контроля, степени нагрузки, саморазвития);
- профессиональная пригодность или дееспособность (общие показатели здоровья, при которых специалист может выполнять свои трудовые обязанности);
- работоспособность (характеристика работника, которая определяет производительность труда, способность человека выполнить поставленные задачи в определенный промежуток времени на заданном уровне эффективности) [1].

В целях исследования проблем профессионального здоровья личности исторически сложилось два направления:

- «от болезни к здоровью» – проведение исследований по изучению профессиональных заболеваний в определенной сфере трудовой деятельности и рисков, их обуславливающих. Факторы риска и их изменения позволяют определить методики и инструменты, которые применимы к специалистам различных профессий, в целях определения уровня профессионального здоровья личности;

– создание безопасных условий труда, предотвращение травматизма. Данное направление предлагает обучение, приобретение знаний и умений в обеспечении безопасных условий труда, минимизации травматизма на рабочих местах.

Одним из первых термин «психология профессионального здоровья» в 1986 г. ввел американский психолог Дж.С. Эверли-младший, который объединил в своей работе влияние проблем гигиены труда и психологии [2].

П. Варр в 1987 г. сформулировал модель, которая определяет влияние работы на психическое здоровье человека, и выделил девять характеристик. «Витаминная модель» – это модель оценки профессионального стресса, которая включает аналогию об избытке или нехватке витаминов в организме человека, как дефицит или «передозировку» выделенных характеристик: физической безопасности, контроля, возможностей для реализации умений, создаваемых извне, разнообразия, ясности, непротиворечивости окружения, соответствующей оплаты, наличия межличностных контактов, ценности социальной позиции [3].

В.Л. Леви предлагает четыре подхода «к обеспечению соотношения рабочего окружения требованиям сохранения и укрепления физического и психического здоровья работающих»:

– комплексный подход, как анализ человека и среды посредством психологических, физических, социальных и экономических аспектов;

– экономический подход, как взаимодействие личности и среды, включает физический и психосоциальный компоненты и функционирует как единая сложная и слаженная система;

– кибернетический подход, который основан на мониторинге состояний работающего человека и окружающей среды через обратную связь, обеспечивая взаимную адаптацию;

– демократический подход, при котором работник воздействует на ситуацию в части принятия решений [4].

Согласно многофакторной теории выгорания К. Маслач и С. Джексон основным индикатором снижения профессионального здоровья человека является синдром выгорания, состоящий из трех компонентов: эмоционального истощения, деперсонализации и редукации профессиональных достижений. Хронический стресс, который ведет к цинизму, равнодушию, апатии и уменьшению эффективности, является реакцией на рабочие перегрузки и приводит к разрушению профессионального здоровья личности.

Подходы к сохранению профессионального здоровья личности согласно модели Job Demands-Resources (JD-R), разработанной Э. Демеруоти и А. Баккером в 2001 г., основаны на влиянии факторов рабочей среды на здоровье и мотивацию специалистов. Данная модель разделяет рабочие процессы на требования, которые вызывают стресс и выгорание, и ресурсы, которые увеличивают мотивацию и вовлеченность работников. Основным принципом сохранения профессионального здоровья личности является поддержание баланса ресурсов и требований в целях обеспечения высокой производительности труда, профессионального благополучия и долголетия.

На основании проведенного анализа мы видим, что в настоящее время подходы к изучению проблем психологии профессионального здоровья личности, в частности зарубежных исследователей, расположены в двух важных направлениях: стресс-менеджмент и управление корпоративным здоровьем. Одним из ярких индикаторов снижения уровня профессионального здоровья личности является профессиональное выгорание специалиста.

В ходе анализа отечественных исследований понятие «профессиональное здоровье» в 1991 г. ввел В.А. Пономаренко. Он определил его как одно из свойств личности, необходимое для поддержания и сохранения защитных механизмов на уровне, который позволит обеспечить наилучшую работоспособность в определенных условиях труда, в том числе и экстремальных [5].

А.Г. Маклаков видит понятие «профессиональное здоровье личности» как совокупность характеристик здоровья человека, которые находятся на определенном уровне и отвечают требованиям к определенной профессиональной деятельности для достижения высокой эффективности труда [6].

Под профессиональным здоровьем личности В.Н. Сысоев понимает способность человека использовать свои адаптационные и защитные механизмы, сохраняя при этом психическое, социальное и физическое благополучие, чем обеспечивает профессиональное долголетие в трудовой деятельности [7].

Р.А. Березовская включает в понятие «профессиональное здоровье личности» уравновешенность социальных запросов социума и свободы действий индивида в рабочих процессах [8].

И.П. Бобровницкий, В.А. Пономаренко, С.А. Бугров рассматривают профессиональное здоровье личности через определение «здоровье – работоспособность – эффективность». Такое определение обусловлено рядом основных положений концепции профессионального здоровья личности и включает ее согласование с элементами целостной системы:

- взаимоотношения в профессиональной среде, социальные потребности и профессиональные возможности человека согласованы между собой в трудовой деятельности;
- физическое здоровье человека, которое позволяет эффективно выполнять поставленные задачи и влияет на эффективность труда;
- саморегуляция, способность восстанавливаться после длительных нагрузок физического и эмоционального характера;
- обеспечение безопасных условий труда при выполнении профессиональных обязанностей;
- социальное благополучие, являющееся одним из факторов меры профессиональной реализации и успеха [9].

По мнению Г.С. Никифорова, профессиональное здоровье человека является интегральной характеристикой функционального состояния организма человека по физическим и психическим показателям для оценки его способностей к выполнению определенной профессиональной деятельности с необходимой эффективностью и продолжительностью, устойчивости к неблагоприятным опасным факторам, которые сопровождают выбранную деятельность» [10].

Б.Г. Ананьев при изучении проблемы профессионального здоровья личности выдвигает две гипотезы, основанные на непосредственной зрелости личности и устойчивости к внешним факторам стресса.

Согласно первой гипотезе профессиональная зрелость человека рассматривается посредством профилактики психосоматических заболеваний, способности создания организационной культуры на рабочих местах, корпоративной культуры, регуляции стресса. Вторая гипотеза предполагает наличие профессиональной деформации в профессии в связи с недостатками организационной культуры на местах, в корпоративной культуре, регуляции стресса, что обуславливает профессиональное выгорание личности на рабочем месте [11].

Современное состояние проблем сохранения профессионального здоровья личности отражено Б.В. Овчинниковым, И.Ф. Дьяконовым, С.А. Лытаевым и относится к аспектам индивидуальной психогигиены, диагностики ранних признаков нарушений психического здоровья, по сути, определяя переходные стадии от здоровья к болезни [12].

Л.Ф. Чекина и В.В. Фатеева рассматривают профессиональное здоровье личности через призму влияния профессионального стресса, который ведет к нервно-психической неустойчивости, повышению личностной тревожности, апатии, усталости и нарушениям концентрации. Профессиональное здоровье личности является способностью организма сохранять защитные механизмы, обеспечивающие работоспособность в условиях стресса.

Таким образом, профессиональное здоровье личности – это процесс, который включает сохранение и развитие регулирующих свойств организма, психической, физической и эмоциональной стабильности, которые позволяют обеспечивать высокий уровень профессиональной деятельности, профессионального долголетия и максимальную продолжительность жизни при имеющихся рисках в определенных условиях труда. К профессиональному здоровью человека относят способность организма сохранять защитные и компенсаторные, восстановительные механизмы, которые обеспечивают работоспособность во всех имеющихся условиях профессиональной деятельности.

Профессиональное здоровье специалиста является интегральной характеристикой функционального состояния организма человека по всем психическим и физическим показателям. Производится оценка его навыков и способностей в определенной профессиональной среде с заданными показателями эффективности и продолжительности труда, устойчивости к факторам риска, которые являются неотъемлемой составляющей указанной деятельности:

- рассмотрение личности человека как субъекта собственных результатов деятельности в комплексе, включая не только его сферу деятельности;

– анализ качества жизни человека, в состав которой входят взаимоотношения в обществе, уровень физического и психического здоровья, уровень образования и образованности, длительность жизни, которые находятся в тесной взаимосвязи с профессиональной надежностью и профессиональным долголетием специалиста [13].

Таким образом, будем определять понятие «профессиональное здоровье личности» как интегративный показатель состояния физического и психического здоровья личности, характеризующий ее способность сохранять защитные механизмы организма на протяжении профессиональной жизни в целях достижения высоких результатов труда в условиях определенной трудовой деятельности. Профессиональное здоровье человека является комплексным понятием и включает поведенческий, эмоциональный и когнитивный аспекты. При комплексном изучении профессионального здоровья специалиста необходимо учитывать не только личностные характеристики человека, но и социальную и психологическую составляющие, обеспечение безопасных и достойных условий труда, уровень профессиональной мотивации. Указанные составляющие весьма актуальны для специалистов помогающих профессий, чья деятельность непосредственно связана с риском для жизни, постоянным наличием стрессовых ситуаций и опасных условий труда [14].

Исследователями профессионального здоровья личности широко используется термин «психология профессионального здоровья» в целях обозначения имеющихся проблем в создании безопасных условий труда, сохранении здоровья специалистов при непосредственном выполнении трудовых обязанностей, а также поиска баланса между работой, семьей и личной жизнью [6; 15].

Данные проблемы весьма актуальны при изучении профессионального здоровья специалистов помогающих профессий, чья деятельность непосредственно связана с риском для жизни. К специалистам указанного спектра относятся работники органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям, поскольку их деятельность включает оказание помощи людям в сложных условиях повышенного травматизма в виде экстремально высоких или экстремально низких температур, наличие опасных факторов в виде обрушения конструкций, перепадов высот, нулевой видимости [16; 17].

Таким образом, изучение профессионального здоровья специалистов органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям позволит выявить профессиональные риски, своевременно найти и применить методики коррекции психологического состояния, что, в свою очередь, позволит повысить уровень профессионального долголетия специалистов.

Одним из индикаторов профессионального здоровья человека является отсутствие эмоционального выгорания, поскольку эмоциональное выгорание является фактором риска для развития многих психосоматических заболеваний, которые снижают уровень физического и психического здоровья специалиста. Длительный стресс приводит к снижению производительности труда, хронической усталости, может спровоцировать депрессию и тревожные расстройства.

Эмоциональное выгорание представляет собой состояние эмоционального, психологического и умственного истощения, которое возникает из-за длительного и постоянного стресса. Спасатели-пожарные, как специалисты помогающей профессии, подвержены стрессовым ситуациям ежедневно в связи с выполнением своих непосредственных рабочих обязанностей. Проявлением факторов эмоционального выгорания у специалистов становятся снижение работоспособности, отстраненность, апатия, отсутствие вовлеченности в рабочие процессы. Профессия спасателя-пожарного является одной из наиболее значимых с нашим социально ориентированном государстве, поскольку деятельность работников направлена на сохранение жизни и здоровья людей. Специалист с отстраненностью и апатией, цинизмом в данной профессии не сможет оказать необходимую помощь людям, которым она нужна. В связи с этим нами рассматривается один из компонентов профессионального здоровья личности, а именно отсутствие показателей эмоционального выгорания у спасателей-пожарных.

В целях выявления уровня эмоционального выгорания работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям, чья деятельность непосредственно связана с риском для жизни, проведено пилотажное исследование с использованием методики «Эмоциональное выгорание» А.В. Бойко.

Ограничения в части проведения полномасштабного исследования заключаются в необходимости определения группы выборки, а именно специалистов сферы деятельности в конкретной узкой специализации органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям,

в связи с прогнозируемыми результатами. Использованная методика А.В. Бойко позволит определить наличие либо отсутствие эмоционального выгорания у испытуемых, что поможет сделать вывод о целесообразности проведения дальнейшего исследования. Психологический отбор и подготовка спасателей-пожарных проходят достаточно сложные уровни, и мы полагаем, что результаты исследования будут незначительными при интерпретации формирования фаз и уровней эмоционального выгорания. В связи с этим в целях дальнейшего исследования при получении отрицательных результатов будут применены более расширенные методики в части выявления составляющих аспектов эмоционального и профессионального выгорания. Ограничение дизайна связано с выявлением наиболее значимого индикатора, влияющего на состояние профессионального здоровья спасателя-пожарного, а именно на отсутствие эмоционального выгорания у респондентов.

В ходе проведения пилотажного исследования выборка составила 30 мужчин, стаж работы которых варьируется от 4 месяцев до 27 лет, в среднем стаж работы составляет 9,1 года. Возраст опрошенных работников составляет от 19 до 47 лет, средний возраст составляет 31 год; 7 человек имеют высшее образование, 23 – среднее или среднее специальное образование.

Проведена интерпретация полученных результатов формирования фаз и уровней эмоционального выгорания.

Исследование фазы «напряжение» позволило определить у работников наличие признаков неудовлетворенности собой, переживания психотравмирующих событий, тревоги, депрессивных признаков, отсутствия психоэмоциональных резервов для преодоления складывающейся ситуации. Оценка результатов фазы «резистенция» (сопротивления) показала уровень снижения эмоциональной вовлеченности, ограничения эмоциональных реакций, снижения редукации профессиональных обязанностей. При изучении фазы «истощение» определен эмоциональный дефицит, деперсонализация, наличие психосоматических и психовегетативных нарушений.

Согласно проведенному исследованию по методике А.В. Бойко получены следующие результаты, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Соотношение результатов формирования фаз эмоционального выгорания для работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям

Фаза	Уровень	Количество человек	%
Напряжение	Фаза не сформировалась	24	80
	Фаза в стадии формирования	4	13
	Фаза сформировалась	2	7
Резистенция	Фаза не сформировалась	20	67
	Фаза в стадии формирования	6	20
	Фаза сформировалась	4	13
Истощение	Фаза не сформировалась	26	87
	Фаза в стадии формирования	4	13
	Фаза сформировалась	0	0

Таким образом, у испытуемых наблюдается низкий процент формирования всех трех фаз. Только у 2 работников фаза «напряжение» и у 4 работников фаза «резистенция» сформированы, фаза «истощение» не сформирована ни для одного работника. В связи с тем что данная методика применяется для диагностики уровня эмоционального выгорания, проведенное исследование позволяет установить тот факт, что спасатели-пожарные, принимавшие участие в исследовании, обладают действенными механизмами психологической защиты, которые позволяют исключать, частично либо полностью, эмоции на психотравмирующие события, которые, в свою очередь, являются частью их повседневной деятельности: ликвидация пожаров, последствий дорожно-транспортных происшествий, иных чрезвычайных ситуаций, связанных с травмиранием или гибелью людей. Данный факт подтверждается показателями «фаза не сформировалась» у 80, 67 и 87 % работников, соответственно. Низкие показатели уровня эмоционального выгорания либо их отсутствие свидетельствуют об удовлетворенности испытуемыми работниками условиями труда, о хороших взаимоотношениях с коллегами, подчиненными, руководством. Вместе с тем наличие у респондентов сформированных фаз «напряжение» и «резистенция» подчеркивает необходимость своевременного

применения методов саморегуляции в целях поддержания профессионального здоровья специалистов.

Заключение

1. Введение понятия «профессиональное здоровье личности» стало необходимым для общества в связи с потребностью определения составляющих здоровья человека при выполнении трудовой деятельности. Гуманистическая направленность подхода выражается в конкретном фокусе на самого человека как субъекта труда, сохранении его физического и психического здоровья, работоспособности, профессионального долголетия, обеспечении безопасных условий труда. Данный подход весьма актуален для специалистов профессий, чья деятельность непосредственно связана с риском для жизни, наличием стрессовых ситуаций и опасных условий труда. Полагаем целесообразным рассматривать понятие «профессиональное здоровье личности» как интегративный показатель состояния физического и психического здоровья личности, характеризующий ее способность сохранять защитные механизмы организма на протяжении профессиональной жизни в целях достижения высоких результатов труда в условиях определенной трудовой деятельности.

2. В ходе проведенного эмпирического исследования нами установлено, что работники органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям, принимавшие участие в исследовании, обладают устойчивыми навыками саморегуляции и механизмами психологической защиты, что указывает на высокую профессиональную надежность и профессиональное здоровье данных специалистов. Удовлетворенность условиями труда, взаимоотношениями в коллективе, достижениями в работе, профессиональной ответственностью позволяет работникам укрепить профессиональное мастерство, обрести поддержку, что положительно влияет на поддержание профессионального здоровья личности. Вместе с тем зафиксированные низкие показатели удовлетворенности условиями труда и сформированные фазы эмоционального выгорания предполагают необходимость своевременной коррекции психологического состояния и развития эмоциональной устойчивости специалистов помогающих профессий, чья деятельность непосредственно связана с риском для жизни, в целях поддержания на всем трудовом пути профессионального здоровья работника.

3. Поддержание профессионального здоровья специалистов посредством профессионального психологического сопровождения является весьма актуальным вопросом, связанным с преодолением возникающих профессиональных рисков через приобретение навыков саморегуляции. При наличии у работника стабильных внутренних ресурсов для поддержания своего профессионального здоровья его работоспособность, профессиональное долголетие позволят достичь более высоких результатов в профессиональной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климов, Е.А. Психология профессионального самоопределения / Е.А. Климов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2000. – 512 с.
2. Everly, G.S. An introduction to occupational health psychology / G.S. Everly // Innovations in clinical practice: A source book / ed. by: P.A. Keller. – Sarasota, Florida: Professional Resource Exchange, 1986. – Vol. 5. – P. 331–338.
3. Warr, P. Work, unemployment, and mental health / P. Warr. – New York: Oxford University Press, 1987. – 361 p. – ISBN 9780198521594.
4. Levi, L. Definitions and the conceptual aspects of health in relation to work / L. Levi // Psychological factors at work and their relation to health. – Geneva: World Health Organisation, 1987. – P. 9–14.
5. Пономаренко, В.А. Психология жизни и труда летчика / В.А. Пономаренко. – М.: Воениздат, 1992. – 224 с.
6. Маклаков, А.Г. Основы психологического обеспечения профессионального здоровья военнослужащих: дис. ... докт. психол. наук: 19.00.03 / Маклаков Анатолий Геннадьевич; Военно-медицинская академия. – СПб., 1996. – 396 л. – EDN: NLIWKF.
7. Становление и развитие психофизиологии военно-профессиональной деятельности в России / под ред. проф. В.Н. Сысоева. – СПб., 2007. – 146 с.
8. Березовская, Р.А. Отношение менеджеров к здоровью / Р.А. Березовская. – СПб.: Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 6. Философия, политология, социология, психология, право, международные отношения, 1999. – № 2. – С. 61–70. – EDN: QRPOZY.
9. Бобровницкий, И.П. Антропоэкологические аспекты профессионального здоровья и некоторые биохимические подходы к проблеме его оценки у лиц опасных профессий / И.П. Бобровницкий,

- В.А. Пономаренко // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1991. – Т. 25, № 2. – С. 31–36.
10. Никифоров, Г.С. Психология профессионального здоровья / Г.С. Никифоров. – СПб.: Речь, 2006. – 208 с. – ISBN 5-9268-0436-1.
 11. Ананьев, Б.Г. Избранные психологические труды: в 2 т. / Б.Г. Ананьев. – М.: Педагогика, 1980. – Т. 1. – 224 с.
 12. Овчинников, Б.В. Психическое и профессиональное здоровье. Психологическая диагностика и коррекция: учеб. пособие / Б.В. Овчинников, И.Ф. Дьяконов, С.А. Лытаев. – СПб.: СпецЛит, 2022. – 295 с. – EDN: XMFBBF.
 13. Чекина, Л.Ф. Теоретико-методологические обоснования проблемы взаимосвязи профессионального стресса и психологического здоровья сотрудника организации / Л.Ф. Чекина, В.В. Фатеева // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 11 (41). – С. 87–93. – EDN: JHQVAN.
 14. Тарасевич, Т.Н. Взаимосвязь организационной среды и профессионального здоровья специалистов помогающих профессий / Т.Н. Тарасевич, М.А. Пономарева // Збірник наукових прац Академії паслядыпломнай адукацыі. – 2023. – № 21. – С. 455–465. – EDN: LZPSLE.
 15. Правдина, Л.Р. Психология профессионального здоровья: учеб. пособие / Л.Р. Правдина. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2016. – 208 с. – EDN: YLMQPF.
 16. Бычкова, М.В. Становление понятия «помогающие профессии» в историческом и социокультурном контексте / М.В. Бычкова // Человек и образование. – 2020. – № 2 (63). – С. 156–160. – DOI: 10.54884/S181570410020803-8. – EDN: ROJJDG.
 17. Веселова, Е.К. Психологическая деонтология: Мировоззрение и нравственность личности: монография / Е.К. Веселова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2002. – 314 с. – EDN: RVICD.

Эмоциональное выгорание спасателей-пожарных
Emotional burnout among firefighters

Тарасевич Татьяна Николаевна

Академия управления при Президенте
Республики Беларусь, кафедра кадровой
политики и психологии управления,
аспирант

Адрес: ул. Московская, 17,
220007, г. Минск, Беларусь

Email: tani_tarasevich@mail.ru

Tat'yana N. Tarasevich

Academy of Public Administration
under the President of the Republic of Belarus,
Chair of Personnel Policy and Management
Psychology, postgraduate student

Address: Moskovskaya str., 17,
220007, Minsk, Belarus

Email: tani_tarasevich@mail.ru

ORCID: 0009-0001-9337-9579

EMOTIONAL BURNOUT AMONG FIREFIGHTERS**Tarasevich T.N.**

Purpose. To analyze theoretical and methodological approaches to the problem of individual occupational health with the aim of introducing an independent definition of «individual occupational health». To conduct an empirical study of the occupational health of employees of emergency response agencies and units using the emotional burnout indicator.

Methods. To analyze the theoretical and methodological approaches of domestic and international scientists to the problem of individual occupational health. A.V. Boyko's «Emotional Burnout» methodology was used to study the level of emotional burnout as a component of the occupational health of employees of emergency response agencies and units.

Findings. A definition of professional health is provided as an integrated indicator of an individual's physical and mental health, characterizing their ability to maintain protective mechanisms throughout their professional life in order to achieve high performance in a given work environment. The level of emotional burnout as a component of the professional health of employees of emergency response agencies and units was studied. The emotional burnout phases of «tension», «resistance», and «exhaustion» were not developed in 80, 67 and 87 % of employees, respectively. Low or absent levels of emotional burnout indicate employees' satisfaction with working conditions and good relationships among colleagues, subordinates, and management. Employees of emergency response agencies and units possess stable self-regulation skills and psychological defense mechanisms, indicating high professional reliability and professional health.

Application field of research. The obtained results demonstrate the feasibility of using A.V. Boyko's methodology for the timely detection of increased levels of emotional burnout and subsequent correction of the psychological state, developing the emotional resilience of employees of emergency response agencies and units to maintain their professional health at a high level.

Keywords: professional health of the individual, employees of emergency response agencies and units.

(The date of submitting: December 3, 2025)

REFERENCES

1. Klimov E.A. Psikhologiya professional'nogo samoopredeleniya [Psychology of professional self-determination]. Rostov-on-Don: Feniks, 2000. 512 p.
2. Everly G.S. An introduction to occupational health psychology. In book: *Innovations in clinical practice: A source book*; ed. by: P.A. Keller. Sarasota, Florida: Professional Resource Exchange, 1986. Vol. 5. Pp. 331–338.
3. Warr P. *Work, unemployment, and mental health*. New York: Oxford University Press, 1987. 361 p. ISBN 9780198521594.
4. Levi L. Definitions and the conceptual aspects of health in relation to work. In book: *Psychological factors at work and their relation to health*. Geneva: World Health Organisation, 1987. Pp. 9–14.
5. Ponomarenko V.A. Psikhologiya zhizni i truda letchika [Psychology of a pilot's life and work]. Moscow: Voenizdat, 1992. 224 p. (rus)
6. Maklakov A.G. Osnovy psikhologicheskogo obespecheniya professional'nogo zdorov'ya voennosluzhashchikh. [Fundamentals of psychological support for the professional health of military personnel]. Grand PhD psyc. sci. diss.: 19.00.03. Military Medical Academy. Saint-Petersburg, 1996. 396 p. (rus). EDN: NLIWKF.
7. *Stanovlenie i razvitie psikhofiziologii voenno-professional'noy deyatel'nosti v Rossii* [Formation and development of psychophysiology of military-professional activity in Russia]. Edited by prof. V.N. Sysoev. Saint-Petersburg, 2007. 146 p.
8. Berezovskaya R.A. Attitude towards health among managers. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 6. Filosofiya, politologiya, sotsiologiya, psikhologiya, pravo, mezhdunarodnye otnosheniya*, 1999. No 2. Pp. 61–70. EDN: QRPOZY
9. Bobrovniitskiy I.P., Ponomarenko V.A. Antropoekologicheskie aspekty professional'nogo zdorov'ya i nekotorye biokhimicheskie podkhody k probleme ego otsenki u lits opasnykh professiy [Anthropoecological aspects of occupational health and some biochemical approaches to the problem of its assessment in people in hazardous professions] *Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina*, 1991. Vol. 25, No. 2. Pp. 31–36.
10. Nikiforov G.S. *Psikhologiya professional'nogo zdorov'ya* [Psychology of occupational health]. Saint-Petersburg: Rech', 2010. 190 p. (rus). ISBN 5-9268-0436-1.

11. Anan'ev B.G. *Izbrannye psikhologicheskie trudy* [Selected psychological works]: in 2 part. Moscow: Pedagogika, 1980. Part 1. 224 p. (rus)
12. Ovchinnikov B.V., D'yakonov I.F., Lytaev S.A. *Psikhicheskoe i professional'noe zdorov'e. Psikhologicheskaya diagnostika i korrektsiya* [Mental and professional health. Psychological diagnostics and correction]: tutorial. Saint-Petersburg. SpetsLit, 2022. 295 p. (rus). EDN: XMFBBF.
13. Chekina L.F., Fateeva V.V. Teoretiko-metodologicheskie obosnovaniya problemy vzaimosvyazi professional'nogo stressa i psikhologicheskogo zdorov'ya sotrudnika organizatsii [Theoretical and methodological substantiation of the problem of the relationship between professional stress and psychological health of an employee of an organization]. *Social Studies and Social Psychology*, 2022. No. 11 (41). Pp. 87–93. (rus). EDN: JHQVAN.
14. Tarasevich T.N., Ponomareva MA. Vzaimosvyaz' organizatsionnoy sredy i professional'nogo zdorov'ya spetsialistov pomo-gayushchikh professiy [Relationship of the organizational environment and professional health of helping professionals]. *Zbornik navukovykh prats Akademii paslyadyplomnay adukatsyi*, 2023. No. 21. Pp. 455-465. (rus). EDN: LZPSLE.
15. Pravdina L.R. *Psikhologiya professional'nogo zdorov'ya* [Psychology of occupational health]: tutorial. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2016. 208 p. EDN: YLMQPF.
16. Bychkova M.V. Stanovlenie ponyatiya «pomogayushchie professii» v istoricheskom i sotsiokul'turnom kontekste [Developing the concept of «helping professions» in the historical and socio-cultural context]. *Man and Education*, 2020. No. 2 (63). Pp. 156–160. DOI: 10.54884/S181570410020803-8. EDN: ROJJDG.
17. Veselova E.K. *Psikhologicheskaya deontologiya: Mirovozzrenie i npravstvennost' lichnosti* [Psychological deontology: Worldview and morality of the individual]: monograph. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University, 2002. 314 p. EDN: RVIICD.

Copyright © 2026 Tarasevich T.N.

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

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ИНТЕРАКТИВНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ НАДЗОРНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Суриков А.В., Зайнудинова Н.В., Довнар Т.А., Жолнерчик В.В.

Цель. Обосновать и разработать педагогическую концепцию создания системы интерактивных имитационных тренажеров-симуляторов, направленную на повышение эффективности формирования надзорно-правовой компетенции у будущих специалистов органов государственного пожарного надзора.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических методов исследования (анализ и синтез).

Результаты. Проведен обзор и анализ научных и литературных источников, рассматривающих принципы контекстного обучения, проблемно ориентированного обучения, теории когнитивной нагрузки, андрагогики и геймификации как основы для педагогической концепции создания системы интерактивных имитационных тренажеров по осуществлению надзорно-профилактической деятельности в области пожарной безопасности. Представлены ключевые принципы концепции системы и определены основные подходы к ее реализации, включая архитектуру. Сформулированы ожидаемые образовательные результаты реализации концепции в образовательном процессе.

Область применения исследований. Полученные результаты исследований могут быть применены при разработке научно-методического обеспечения, направленного на формирование надзорно-правовой компетенции специалистов органов государственного пожарного надзора.

Ключевые слова: контекстное обучение, проблемно ориентированное обучение, теории когнитивной нагрузки, андрагогика, геймификация, профессиональные компетенции, органы государственного пожарного надзора, имитационные тренажеры, информационные технологии.

(Поступила в редакцию 10 ноября 2025 г.)

Введение

Профессиональная подготовка специалистов для органов государственного пожарного надзора (ГПН) относится к сфере, где неправильные действия должностного лица или неверная интерпретация нормативных правовых актов (НПА) могут иметь прямые негативные социальные и экономические последствия. Образовательный процесс в указанном сегменте характеризуется необходимостью освоения знаний не только значительного количества НПА, но и формирования специальных навыков по реализации порядка осуществления надзорно-профилактических мероприятий, установленного законодательством. Эффективность деятельности должностного лица органа ГПН во многом определяется именно уровнем сформированности указанных компетенций, т.е. способностью выполнять достаточно сложные (зачастую разветвленные) алгоритмы действий, установленные НПА.

В структуре подготовки специалистов для органов ГПН, осуществляемой в Университете гражданской защиты, формированию надзорно-правовой компетенции уделена одна из ключевых ролей. Данную компетенцию образуют следующие компоненты:

- осуществление государственного надзора в области обеспечения пожарной безопасности;
- осуществление в соответствии с законодательными актами производства по делам об административных правонарушениях;
- осуществление в соответствии с законодательными актами производства дознания по уголовным делам.

Первый из перечисленных компонентов формируется при освоении учебной дисциплины «Надзорная деятельность», второй и третий – «Правоприменительная деятельность».

В рамках настоящей работы акцент сделан на преодолении существующих дидактических барьеров относительно первого компонента, однако некоторые положения, несо-

мненно, могут быть экстраполированы и на компоненты, формируемые при освоении учебной дисциплины «Правоприменительная деятельность». К указанным проблемам в первую очередь можно отнести следующие.

1. Отсутствие у обучающихся базовой юридической подготовки.

Одной из ключевых особенностей подготовки специалистов для органов ГПН является междисциплинарность. Установленные законодательством функции органов ГПН предъявляют высокие требования к освоению технических дисциплин (прежде всего требований пожарной безопасности, регулируемых различными НПА, в том числе техническими нормативными актами), юридических дисциплин (т.е. формирование надзорно-правовой компетенции), а также дисциплин гуманитарного профиля в силу того, что значительный объем действий в процессе реализации профессиональных функций работника органа ГПН связан с коммуникацией с различными субъектами. Отсутствие фундаментальных знаний в области права создает дополнительный когнитивный барьер для усвоения сложного нормативного материала и понимания особенностей надзорной деятельности.

2. Учебная дисциплина «Надзорная деятельность» характеризуется высокой терминологической плотностью и значительным количеством специальных понятий из различных сфер законодательства.

В частности, учебный материал охватывает такие сферы, как законодательство о пожарной безопасности, законодательство об административных процедурах, законодательство об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, законодательство о лицензировании, законодательство об оценке соответствия, законодательство в сфере профилактики правонарушений и др. Все это создает повышенную когнитивную нагрузку, препятствующую формированию устойчивых профессиональных навыков, в особенности на начальном этапе обучения.

3. Значительный объем нормативно-правовой базы, регулирующей профессиональную деятельность органов ГПН. В данном случае речь идет о НПА, которые обучающийся должен не просто знать, но и уметь применять в конкретных профессиональных ситуациях. Достаточно упомянуть, что учебная программа по дисциплине «Надзорная деятельность» (по состоянию на 01.09.2025) включает изучение 57 НПА. Изложение такого количества сложного учебного материала без должной методической разработки может привести к тому, что обучающиеся не смогут эффективно интегрировать полученные знания в рабочие алгоритмы, что, в свою очередь, может приводить к поверхностному усвоению и неспособности корректно применять нормативно обусловленные процедурные навыки в реальных ситуациях.

4. Частые изменения в законодательстве.

К примеру, с начала 2025 г. было введено в действие либо внесены изменения в 14 основополагающих НПА, регулирующих деятельность органов ГПН (данные приведены по состоянию на конец октября 2025 г.). Указанное обстоятельство определяет обязательность постоянной актуализации научно-методического обеспечения.

Все вышеперечисленные дидактические барьеры формируют необходимость поиска новых подходов, направленных на нивелирование потенциальных отрицательных эффектов, связанных с указанными проблемами, в процессе подготовки специалистов для органов ГПН. По мнению авторов настоящей работы, одним из вариантов решений является разработка педагогического инструментария, который бы обеспечивал дозирование юридической сложности и структурировал процесс принятия соответствующих процессуальных решений. Указанный инструментарий должен базироваться на современных принципах когнитивной психологии и образовательных технологиях (прежде всего, принципах контекстного обучения, проблемно ориентированного обучения, теории когнитивной нагрузки, андрагогики и геймификации). Последнее связывается с разработкой специальных имитационных систем для эффективного формирования надзорно-правовой компетенции применительно к проведению надзорно-профилактических мероприятий.

Таким образом, целью работы является теоретическое обоснование и разработка педагогической концепции создания системы интерактивных имитационных тренажеров-симуляторов, направленной на повышение эффективности формирования надзорно-правовой компетенции у будущих специалистов органов ГПН.

Основная часть

Теоретико-методологические аспекты концепции. Теория контекстного обучения утверждает, что эффективное освоение профессиональной деятельности происходит тогда, когда обучающийся с самого начала помещен в контекст будущей профессии. Согласно этой теории в образовательной деятельности должно последовательно моделироваться предметное, социальное и морально-нравственное содержание профессиональной деятельности специалиста [1]. Автор работы [1] выделяет три базовые формы деятельности обучающегося в контекстном обучении:

- учебная деятельность академического типа – традиционные лекции, семинары, работа с учебной литературой;
- квазипрофессиональная деятельность (формирование в рамках подготовки обучающегося его целостной, внутренне мотивированной профессиональной деятельности как будущего специалиста [2; 3]) – деловые и дидактические игры, анализ конкретных ситуаций, имитационное моделирование;
- учебно-профессиональная деятельность – практики, стажировки, научно-исследовательская работа.

Необходимо обозначить, что все указанные формы контекстного обучения внедрены в образовательный процесс Университета гражданской защиты при реализации учебных программ надзорно-профилактического профиля. При формировании научно-методического обеспечения (текстов лекций, презентационных материалов, учебной литературы) активно используются принципы современной педагогики, возрастной психологии и теории когнитивной нагрузки (например, структурированный, сегментированный и сигнальный дизайн учебных материалов, применение инфографики, диаграмм, схем и т.д.). Наиболее яркими примерами внедрения элементов квазипрофессиональной деятельности как формы контекстного обучения при подготовке обучающихся по направлению надзорно-профилактической деятельности является применение разработанных в университете обучающих тренажеров [4]. Учебно-профессиональный компонент контекстного обучения реализуется за счет прохождения обучающимися учебных и производственных практик на базах территориальных подразделений по чрезвычайным ситуациям в должностях инженерно-инспекторского состава органов ГПН.

Вместе с тем следует отметить, что имеющиеся элементы научно-методического обеспечения в полной мере не решают обозначенных дидактических проблем, урегулирование которых видится в создании новых средств обучения. По нашему мнению, реализация последних должна предусматривать разработку дидактических средств, направленных:

- на формирование понятийного аппарата и четкого представления обучающегося о значимости того или иного термина в его будущей профессиональной деятельности (например, создание профессионально ориентированного глоссария, а также специальных тренажеров, направленных на решение задач по определению видов строительной деятельности, классов сложности объектов строительства при осуществлении нормативно-технической работы, категорий граждан и мер реагирования при выявлении критериев небезопасного проживания на объектах жилищного фонда и т.д.);
- формирование правовой грамотности (например, создание интерактивной карты нормативного поля профессиональной деятельности применительно к организации осуществления государственного надзора в области обеспечения пожарной безопасности);
- симуляцию конечных профессиональных ситуаций (например, порядок проведения оценки риска при планировании выборочных проверок, реализации различных форм контроля, проведения пожарно-профилактической работы в жилищном фонде и т.д.).

Проблемно ориентированное обучение заключается в том, что в процессе учебных занятий создаются специальные условия, в которых обучающийся, опираясь на приобретенные знания, самостоятельно обнаруживает и осмысливает учебную профессиональную проблему, мысленно и практически действует в целях поиска и обоснования наиболее оптимальных вариантов ее решения [5–7]. Применительно к разрабатываемой системе тренажеров наиболее целесообразным видится создание модульной системы, каждый элемент которой будет представлять собой отдельную профессиональную проблемную ситуацию. При этом структуру модулей необходимо предусмотреть в привязке к основным направлениям надзорной деятельности органов ГПН – проведению надзорных мероприятий (проверок и мониторингов), нормативно-технической работе, пожарно-профилактической работе и т.д.

Решение проблемных ситуаций, симулирующих профессиональную деятельность органов ГПН, потребует от обучающихся проведения анализа ситуации и выявления недостающей информации, поиска и изучения необходимых НПА, применения найденных НПА к конкретным условиям и принятия обоснованных профессиональных решений.

Теория когнитивной нагрузки, разработанная Дж. Свеллером в конце 1980-х гг., – это теория из образовательной и психологической сферы, которая утверждает, что оптимального усвоения материала у обучающихся можно достичь только через адекватную нагрузку на их оперативную память. В работе [8] автор, ссылаясь на классические исследования Дж. Миллера, исходит из фундаментального ограничения человеческой познавательной архитектуры: оперативная (рабочая) память имеет ограниченную «емкость» (5–9 элементов) и может удерживать информацию лишь короткое время. При этом долгосрочная память практически безгранична и хранит знания в виде схем – организованных структур взаимосвязанной информации. Однако уже в более поздней работе [9] Дж. Свеллер уточняет, что эффективный средний объем рабочей памяти зачастую составляет около 4 ± 1 элементов для сложных обучающих задач. Основой такого уточнения послужила работа Н. Коузена [10]. Это значит, что большинство людей способны одновременно удерживать и обрабатывать лишь 3–5 независимых единиц информации, если задача не позволяет объединять их в более крупные смысловые блоки. Такой вывод был сделан на основании большого числа экспериментов, которые показали, что ранее принятая оценка « 7 ± 2 » завышена для истинного объема рабочей памяти.

Таким образом, в оригинальной теории когнитивной нагрузки подчеркивается, что человеческая рабочая память очень ограничена и именно это ограничение необходимо учитывать при проектировании учебных материалов, чтобы избежать перегрузки обучающихся.

В самой теории Дж. Свеллер выделяет три типа когнитивной нагрузки:

– внутренняя когнитивная нагрузка, определяемая сложностью самого учебного материала и уровнем предварительных знаний обучающегося. В контексте настоящей работы указанный тип особенно характерен для обучающихся, имеющих низкий уровень базовой юридической подготовки. Эту нагрузку невозможно устранить, но ее можно управляемо снижать через принцип «от простого к сложному» и поэтапно представлять материал;

– внешняя когнитивная нагрузка, формируемая вследствие неоптимального способа представления информации и не связанная непосредственно с содержанием обучения (например, плохо структурированные тексты, избыточные визуальные элементы, несогласованность между различными источниками информации, необходимость одновременно обращаться к множеству документов). Это нагрузка, которую необходимо сводить к минимуму;

– релевантная когнитивная нагрузка – это когнитивные усилия, направленные непосредственно на обработку информации, построение и автоматизацию схем. Это нагрузка, на которую делается основной акцент.

Следует отметить, что рассматриваемая теория фактически лежит в основе информационной концептуальной модели требований пожарной безопасности, разработанной профессором В.И. Козлачковым [11], и в настоящее время остающейся одной из наиболее эффективных методик проведения проверок противопожарного состояния объектов и подготовки должностных лиц органов ГПН. В работе [12] авторами настоящей статьи уже использовались положения модели В.И. Козлачкова для разработки информационной концептуальной модели профессиональной деятельности должностных лиц органов ГПН при осуществлении надзорно-профилактических мероприятий (на примере организации проведения мониторинга). Положения указанной работы в полной мере применимы и для разработки процедурных тренажеров по осуществлению других форм государственного контроля (надзора) – проверок и мероприятий технического (технологического, поверочного) характера.

Основываясь на положениях рассматриваемой теории, можно выделить следующие аспекты в создании системы тренажеров:

1. Для управления внутренней когнитивной нагрузкой:

– создаваемая система должна иметь модульную архитектуру, позволяющую начинать процесс обучения с простых задач и постепенно переходить к комплексным с множественными параметрами.

2. Для снижения внешней когнитивной нагрузки необходима разработка:

– интерактивного глоссария и интерактивной карты нормативного поля профессиональной деятельности (своеобразного нормативного навигатора), позволяющих быстро

«освежать в памяти» обучающихся специальной терминологии и ориентироваться в нормативной базе;

– процедурные симуляторы (по порядку действий должностных лиц органов ГПН при проведении различных надзорно-профилактических мероприятий) должны иметь четкую структуру с последовательными шагами;

– интерфейс всех структурных элементов системы должен быть единообразным, а для их узнаваемости и комфорта обучающихся стиль оформления тренажеров должен соответствовать современным тенденциям в инфографике и оформлении интерфейсов цифровых продуктов.

3. Для стимулирования релевантной нагрузки:

– направить усилия обучающегося на решение профессиональной задачи, а не на преодоление когнитивных барьеров с интерфейсом или поиском информации;

– для ускорения формирования когнитивных схем обеспечить немедленную обратную связь (например, подсветку правильных/неправильных ответов);

– для автоматизации навыков обеспечить возможность многократного прохождения с различными параметрами.

При разработке системы тренажеров, помимо когнитивной нагрузки, необходимо учитывать принципы *андрагогики* [13–16]. В частности, разрабатываемая система тренажеров должна обеспечивать понимание их практической ценности, проявляющееся в применении требований НПА при решении конкретных профессиональных задач. Каждый симулятор должен представлять собой своеобразную тренировку определенного профессионального навыка, будь то работа с НПА и поиск необходимой информации либо принятие конкретных процессуальных решений и т.д.

Для обеспечения принципа самостоятельности в изучении образовательных вопросов тренажеры будут обеспечивать возможность выбора обучающимся индивидуального темпа работы, например возможность вернуться к предыдущим шагам и повторить попытку.

Собственный опыт обучающихся будет активизироваться в процессе моделирования профессиональных ситуаций.

Повышение внутренней мотивации обучающихся может стимулироваться за счет применения элементов геймификации [17] и, как уже упоминалось ранее, немедленной обратной связи, что будет способствовать ощущению прогресса в обучении и повышению уровня знаний.

Обращаясь к использованию *геймификации* при формировании надзорно-правовой компетенции для разработки системы тренажеров-симуляторов, следует учитывать следующее:

– каждый симулятор должен иметь конкретную задачу (провести проверку либо мониторинг, оценить риск нарушения законодательства проверяемым субъектом, определить класс сложности объекта строительства и т.д.), а также понятные критерии успешного решения;

– для создания ощущения продвижения должна обеспечиваться поэтапность прохождения симуляторов (в случае, если это является целесообразным для решения конкретной образовательной задачи).

Проведенный анализ теоретических аспектов позволяет сформулировать концепцию создания системы интерактивных имитационных тренажеров – создание цифровой образовательной системы, моделирующей профессиональную среду должностных лиц органов ГПН и обеспечивающей поэтапное управляемое формирование процедурных навыков и компетенций через систему взаимосвязанных интерактивных симуляторов с немедленной обратной связью и рефлексивной оценкой результатов.

Архитектура тренажеров. Основываясь на результатах представленного в основной части настоящей статьи анализа, можно выделить следующие ключевые принципы архитектуры интерактивных тренажеров:

1. Принцип модульности и масштабируемости.

2. Принцип иммерсивности и ситуативности.

3. Принцип активного действия и немедленной обратной связи.

4. Принцип рефлексивной оценки.

Рассмотрим каждый из представленных принципов.

Наиболее целесообразным с точки зрения построения архитектуры системы является использование модульного принципа. Разрабатываемая система должна представлять собой

выполненную в едином стиле и объединенную в единую оболочку-практикум образовательную платформу, в которую встраиваются отдельные тематически связанные модули/подмодули-симуляторы. Каждый модуль (подмодуль) предназначен для отработки конкретных аспектов профессиональной деятельности.

Контекст модулей должен соответствовать основным направлениям профессиональной деятельности органов ГПН:

- осуществление проверок и мониторингов;
- осуществление нормативно-технической работы;
- осуществление пожарно-профилактической работы;
- осуществление государственного надзора за соблюдением требований технических регламентов Таможенного союза, Евразийского экономического союза в области пожарной безопасности;
- лицензирование деятельности в области обеспечения пожарной безопасности.

Отдельным модулем, по нашему мнению, может быть предусмотрен модуль «Планирование деятельности».

На этапе разработки архитектуры можно выделить следующие основные подмодули:

- инструментальные – подмодули, формирующие специализированные базовые навыки (оценка риска нарушения законодательства при планировании выборочных проверок, определение вида строительной деятельности, определение класса сложности объекта строительства, определение категорий граждан и мер реагирования при выявлении критериев небезопасного проживания и т.д.);

- процедурные симуляторы – подмодули, предназначенные для моделирования конкретных нормативно обусловленных действий (проведение проверок, мониторингов, мероприятий технического (технологического, поверочного) характера, выдача заключений о соответствии объектов строительства и т.д.);

- вспомогательные – подмодули, направленные на снижение когнитивной нагрузки (профессионально ориентированный глоссарий и нормативный навигатор).

Предварительная архитектура системы приведена на рисунке 1.

Модульность обеспечит:

- гибкость при реализации образовательного процесса: преподаватель может использовать модули в различных сочетаниях и последовательности в зависимости от учебных задач;
- масштабируемость: в систему легко добавить новые либо внести изменения в существующие модули (подмодули) при необходимости (например, при изменении законодательства);
- актуализацию: каждый модуль (подмодуль) может обновляться независимо от других, что решает проблему учета внесения изменений в законодательство;
- индивидуализацию: обучающиеся могут работать с модулями (подмодулями) в удобном для них формате, возвращаться к пройденному материалу.

Реализация принципа иммерсивности и ситуативности заключается в том, что каждый симулятор создает иммерсивную (погружающую) профессиональную ситуацию с конкретными параметрами, датами, характеристиками и т.д. Такая детализация создает эффект присутствия и заставляет обучающегося воспринимать выполняемую задачу не как учебное упражнение, а как реальную профессиональную ситуацию, что в полной мере соответствует теории контекстного обучения.

Одним из преимуществ использования цифровых решений при создании симуляторов является возможность реализации автоматической случайной генерации исходных данных учебных заданий (например, параметров объектов, начала проведения надзорно-профилактических мероприятий, выявленных нарушений требований пожарной безопасности и т.д.). Такой подход будет способствовать обеспечению вариативности ситуаций и развитию адаптивности мышления.

Работа обучающихся с тренажерами предполагает непрерывную активность (принцип активного действия): заполнение полей, выбор вариантов, сопоставление данных либо принятие решения. В качестве механизмов реализации обратной связи необходимо предусматривать: визуальную индикацию правильности/неправильности принятого решения; пояснения (подсказки или ссылки на соответствующий пункт НПА, требования которого не соблюдены); функцию накопительной статистики и формирования отчетных материалов. Помимо традиционной формы отчетов (количество либо процент правильных/неправильных

ответов), предлагается реализация функции формирования рекомендаций для обучающихся, в которых будут отражаться их результаты, а также персональные рекомендации по дополнительному изучению конкретных положений НПА.

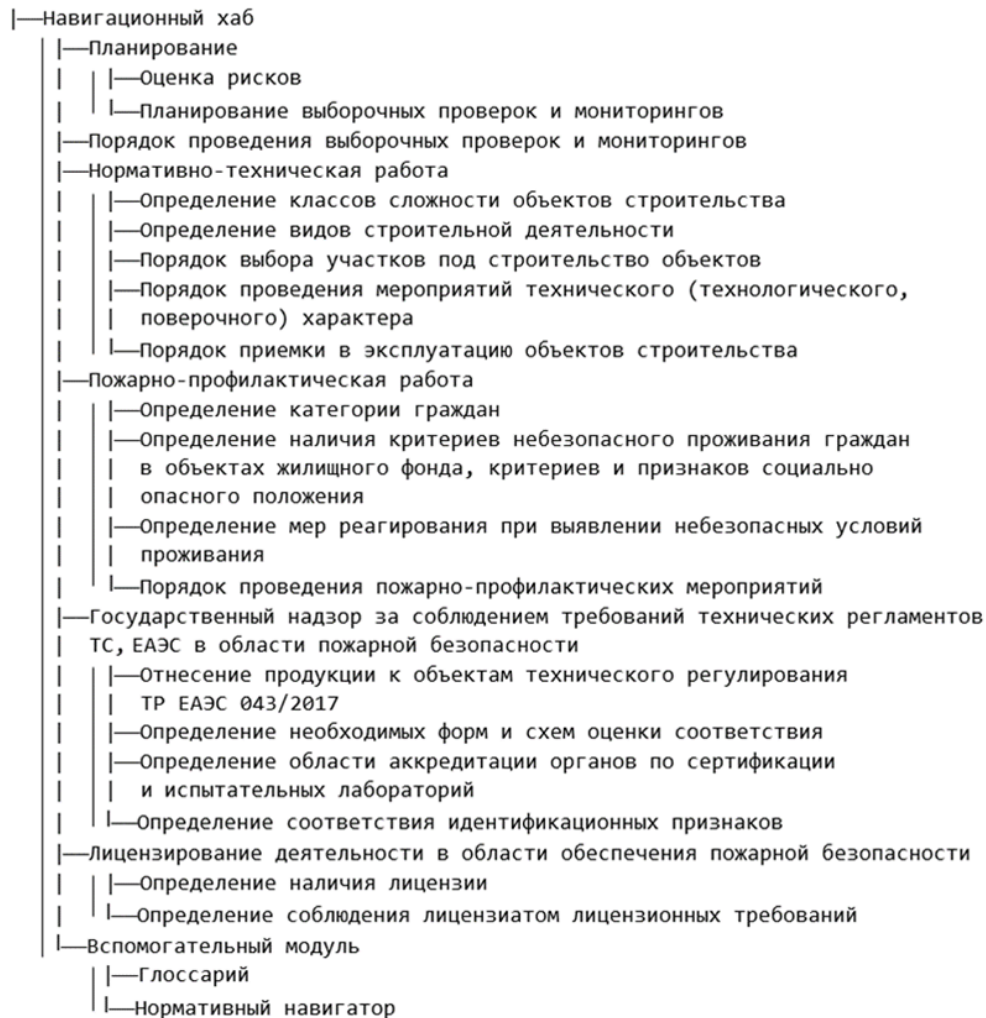


Рисунок 1. – Архитектура разрабатываемой системы интерактивных имитационных тренажеров по осуществлению надзорно-профилактической деятельности в области пожарной безопасности

Принцип активного действия реализуется через формирование правильных когнитивных схем, предотвращение закрепления ошибочных действий, а также повышение мотивации через ощущение прогресса.

Механизмы реализации обратной связи тесно связаны с принципом рефлексивной оценки, осуществляемом на завершающем этапе работы с каждым симулятором. Данный принцип обеспечивает осознанный анализ обучающимся своей деятельности, выявление успехов и проблемных зон. Указанный принцип реализуется через систему отчетности. Для преподавателей эта система позволяет получить объективные данные об успеваемости обучающихся, выявить типичные ошибки и скорректировать методику преподавания, определить обучающихся, нуждающихся в дополнительной поддержке, оценить эффективность отдельных модулей (подмодулей) системы. В свою очередь, для обучающихся – это возможность увидеть общую картину своих достижений (процент правильных ответов), выявить конкретные ошибки и понять их причины, определить, какие темы (отдельные вопросы) требуют дополнительной проработки, а также отследить свой прогресс при повторном прохождении.

Обсуждение и ожидаемый педагогический эффект. Предложенная концепция и ее реализация направлены на решение четырех дидактических барьеров, обозначенных во введении. Решение проблемы отсутствия базовой юридической подготовки видится через внедрение системы тренажеров-симуляторов. Подобный подход, по мнению авторов настоящей

статьи, способен качественно дополнить применяемые традиционные элементы научно-методического обеспечения за счет погружения обучающихся в квазипрофессиональную деятельность, где НПА становятся инструментом решения конкретных профессиональных задач. Это может способствовать формированию «юридического мышления» не только через теоретическое изучение требований норм законодательства, но и через их практическое применение в моделируемых ситуациях. Обучающийся учится не просто знать НПА, но и работать с ними.

Решение проблемы сложной терминологии путем разработки профессионально ориентированного глоссария является классическим примером реализации принципов контекстного обучения. Особенность создания глоссария заключается в том, что термины и их определения связываются с конкретным профессиональным контекстом. Каждый термин разъясняется с точки зрения его применения в будущей профессиональной деятельности. Подобный дидактический прием усиливает понимание сложных терминов за счет многослойной подачи: термин → нормативное определение → разъяснение → контекст применения.

Решение проблемы значительного количества НПА в рамках концепции предлагается по двум направлениям.

Во-первых, создание соответствующего отдельного подмодуля, т.е. интерактивной карты нормативного поля профессиональной деятельности (нормативного навигатора). Структура подмодуля представляется следующей: все нормативное поле учебной дисциплины разделяется на смысловые блоки (например, общие положения законодательства, регулирующие деятельность органов ГПН, порядок осуществления надзорных мероприятий, нормативно-техническая работа и т.д.), затем (при необходимости) каждый блок разделяется на более узкие направления (например, первый из перечисленных блоков – законодательство о пожарной безопасности; права, обязанности, компетенция должностных лиц органов ГПН и т.д.). Каждый структурный элемент модуля будет содержать наименование НПА, которым регулируется тот или иной вопрос, краткое описание НПА, а также прямую ссылку на правовые порталы для возможности ознакомления с полнотекстовой версией документа.

Такой формат предоставления учебного материала может помочь обучающимся сформировать навыки самостоятельного ориентирования в нормативном поле учебной дисциплины, видеть ее структуру целиком, самостоятельно выстраивать индивидуальные траектории обучения, что в итоге будет способствовать формированию системного мышления.

Вторым элементом решения проблемы значительного количества НПА является главный принцип построения разрабатываемой системы тренажеров – его модульность. Модульная структура позволяет фокусироваться на конкретной задаче либо процедуре и релевантных для нее НПА, избегая информационной перегрузки. Каждый симулятор охватывает ограниченный набор документов, необходимых для решения конкретной задачи. Вместе с тем переход от инструментальных подмодулей к прохождению процедурных симуляторов приводит к расширению спектра используемых НПА, т.е. решение задач с использованием одного-двух документов трансформируется в решение комплексных задач, требующих анализа большего количества источников.

Проблема частых изменений в законодательстве решается прежде всего за счет цифрового формата разрабатываемой системы. Модульная структура позволяет за достаточно короткий промежуток времени вносить адресные корректировки в соответствующие тренажеры, что никак не влияет на работу системы в целом. Главным преимуществом такого подхода является возможность предоставлять обучающимся максимально актуальную информацию, необходимую для их будущей профессиональной деятельности.

К главным ожидаемым результатам реализации концепции можно отнести:

1. Повышение мотивации обучающихся за счет снижения внешней когнитивной нагрузки через структурирование информации и поэтапное предъявление задач, интерактивности, геймификации и немедленной обратной связи.

2. Формирование практико-ориентированных компетенций путем создания квазипрофессионального контекста, моделирующего реальные ситуации надзорной деятельности.

3. Развитие алгоритмического мышления. Работа с симуляторами формирует устойчивые когнитивные схемы, представляющие алгоритмы решения типовых профессиональных задач.

4. Ускорение адаптации к профессиональной деятельности. Обучающимся, прошедшим подготовку с использованием симуляторов, требуется меньше времени на адаптацию к реальной работе, т.к. они уже имеют квазипрофессиональный опыт.

5. Развитие профессиональной идентичности. Погружение в контекст профессиональной деятельности способствует более раннему и осознанному формированию профессиональной идентичности. Обучающиеся начинают идентифицировать себя с ролью инспектора органа ГПН, что усиливает их вовлеченность в обучение.

Заключение

Разработанная педагогическая концепция создания системы интерактивных имитационных тренажеров для обучения процедурным знаниям в области надзорной деятельности является научно обоснованным ответом на дидактические проблемы, связанные с высокой сложностью учебного материала и необходимостью формирования практических компетенций. Представленная концепция обосновывает подход к проектированию и применению системы интерактивных симуляторов как к высокоэффективной образовательной технологии, адекватной вызовам современной профессиональной подготовки.

Модель системы, основанная на актуальных принципах когнитивной нагрузки и образовательных технологиях, призвана обеспечить комплексное и технологически эффективное решение проблемы формирования процедурных компетенций должностных лиц органов ГПН в области надзорной деятельности. Реализация концепции в виде системы интерактивных симуляторов позволяет создать управляемую, насыщенную профессиональным контекстом среду, которая минимизирует внешнюю когнитивную нагрузку и максимизирует усилия обучающихся, направленные на формирование устойчивых алгоритмов правоприменительной деятельности.

Интеграция геймификации дополнительно решает психолого-педагогические задачи, повышая мотивацию обучающихся. Внедрение системы представляет собой необходимый этап в развитии компетентностного подхода в образовании в сфере пожарной безопасности, обеспечивая подготовку специалистов, способных к юридически точным действиям в реальных профессиональных условиях.

Педагогическая концепция создания системы интерактивных имитационных тренажеров в сфере надзорно-профилактической деятельности по пожарной безопасности не заменяет традиционные формы обучения, а направлена на усиление классической подготовки, обеспечивая интеграцию теоретических знаний, прикладных умений, что является перспективным направлением развития цифровой дидактики в профессиональном образовании, ориентированным на подготовку высококомпетентных специалистов, способных эффективно действовать в условиях динамично меняющегося нормативного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вербицкий, А.А. Активное обучение в высшей школе: контекстный подход: метод. пособие / А.А. Вербицкий. – М.: Высш. шк., 1991. – 207 с.
2. Вахитова, Г.Х. Квазипрофессиональная деятельность в подготовке будущих специалистов предшкольного образования / Г.Х. Вахитова // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2016. – № 5 (170). – С. 64–66. – EDN: XVKNLL.
3. Кузеванова, Е.В. Роль квазипрофессиональной деятельности в актуализации творческой самореализации бакалавров ПедВУЗа / Е.В. Кузеванова // Сибирский педагогический журнал. – 2013. – № 6. – С. 148–152. – EDN: RPVMVD.
4. Полевода, И.И. Методология разработки обучающего тренажера для подготовки специалистов органов государственного пожарного надзора с применением технологии виртуальной реальности / И.И. Полевода, С.Г. Короткевич, Д.С. Нехань [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 2. – С. 184–202. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.184. – EDN: FQKMYK.
5. Батяева, Е.Х. Проблемно-ориентированное обучение: сущность, недостатки, преимущества / Е.Х. Батяева, Т.В. Ким, И.А. Барышникова [и др.] // Медицина и экология. – 2016. – № 1. – С. 115–119. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemno-orientirovannoe-obuchenie-suschnost-nedostatki-preimuschestva> (дата обращения: 05.11.2025).
6. Тамбиева, М.Д. Проблемно-ориентированное обучение иностранному языку / М.Д. Тамбиева, З.А.Д. Биджиев, Д.А.М. Гочияева // Проблемы современного педагогического образования. – 2023. – № 80-3. – С. 265–267. – EDN: IJMTLM.

7. Душкин, А.С. Реализация проблемно-ориентированного и проектно-ориентированного обучения в профессиональной переподготовке начинающих преподавателей образовательных организаций МВД России / А.С. Душкин, Т.Л. Журавлева, Ю.К. Нимировская // Вестник Уфимского юридического института МВД России. – 2022. – № 1 (95). – С. 148–155. – EDN: YINQDV.
8. Sweller, J. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design / J. Sweller // Cognitive Science. – 1988. – Vol. 12, No. 2. – P. 257–285.
9. Sweller, J. Cognitive load theory / J. Sweller, P. Ayres, S. Kalyuga. – New York: Springer, 2011. – 291 p. – (Series: Explorations in the Learning Sciences, Instructional Systems and Performance Technologies (LSIS, vol. 1)). – DOI: 10.1007/978-1-4419-8126-4.
10. Cowan, N. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity / N. Cowan // Behavioral and Brain Sciences. – 2001. – Vol. 24, No. 1. – P. 87–114. – DOI: 10.1017/s0140525x01003922.
11. Козлачков, В.И. Типовая и риск-ориентированная модели надзорной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности. Сравнительный анализ: монография / В.И. Козлачков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – 328 с. – EDN: WAWXQB.
12. Суриков, А.В. Информационная концептуальная модель профессиональной деятельности должностных лиц органов государственного пожарного надзора при осуществлении надзорно-профилактических мероприятий (на примере организации проведения мониторинга) / А.В. Суриков, Н.В. Зайнудинова, С.А. Барыш // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 2. – С. 233–245. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-2.233. – EDN: ZHXRWB.
13. Кукуев, А.И. Андрагогика в изложении последователей Малколма Ш. Ноулза / А.И. Кукуев // Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения. – 2008. – № 4-1. – С. 210–216. – EDN: RUMLBN.
14. Шелеметьева, В.А. Принципы андрагогического подхода в разработке электронных учебных курсов / В.А. Шелеметьева // Проблемы современного педагогического образования. – 2019. – № 62-2. – С. 248–250. – EDN: YXUTMT.
15. Вылешанина, О.Е. Сравнительный анализ педагогической и андрагогической моделей обучения / О.Е. Вылешанина, М.В. Бавтрушева // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. – 2009. – № 1 (25). – С. 141–144. – EDN: QBFKJD.
16. Суйкова, О.А. Андрагогические принципы в реализации непрерывного образования взрослых / О.А. Суйкова // Научное обеспечение системы повышения квалификации кадров. – 2018. – № 4 (37). – С. 61–67. – EDN: VTXRМК.
17. Закалинская, К.В. Применение мобильных технологий для формирования культуры безопасности жизнедеятельности у детей младшего школьного возраста: опыт разработки и оценки / К.В. Закалинская, А.В. Суриков, Н.В. Зайнудинова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 3. – С. 325–334. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-3.325. – EDN: OBLPGT.

Педагогическая концепция создания системы интерактивных имитационных тренажеров по осуществлению надзорно-профилактической деятельности в области пожарной безопасности

Pedagogical concept for the development of a system of interactive simulation trainers for implementing supervisory and preventive activities in the field of fire safety

Суриков Андрей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра организации надзорной и профилактической деятельности, начальник кафедры
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: shurikoff@bk.ru
SPIN-код: 1163-6294

Andrey V. Surikov

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 Organization of Supervisory and Preventive Activities, Head of the Chair
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: shurikoff@bk.ru
ORCID: 0000-0002-3659-7297

Зайнудинова Наталья Владимировна

кандидат технических наук, доцент
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: Zainudzinava@gmail.com
SPIN-код: 3032-4413

Natal'ya V. Zaynudinova

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Department of Organization of Training of Managers and Specialists in the Field of Emergency Protection, Head of Department
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: Zainudzinava@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1848-1562

Довнар Татьяна Александровна

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра организации надзорной и профилактической деятельности, старший преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: osnipo@ucp.by

Tat'yana A. Dovnar

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Organization of Supervisory and Preventive Activities, Senior Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: osnipo@ucp.by
ORCID: 0009-0004-3540-1645

Жолнерчик Виолетта Витальевна

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра организации надзорной и профилактической деятельности, преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: osnipo@ucp.by

Violetta V. Zholnerchik

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Organization of Supervisory and Preventive Activities, Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: osnipo@ucp.by
ORCID: 0009-0009-5689-2531

PEDAGOGICAL CONCEPT FOR THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF INTERACTIVE SIMULATION TRAINERS FOR IMPLEMENTING SUPERVISORY AND PREVENTIVE ACTIVITIES IN THE FIELD OF FIRE SAFETY

Surikov A.V., Zaynudinova N.V., Dovnar T.A., Zholnerchik V.V.

Purpose. To substantiate and develop a pedagogical concept for creating a system of interactive simulation training simulators aimed at increasing the effectiveness of the formation of supervisory and legal competence among future specialists of the State Supervisory Authority.

Methods. The general methodology of the work involved the use of theoretical research methods (analysis and synthesis).

Findings. A review and analysis of scientific and literary sources has been conducted, considering the principles of contextual learning, problem-based learning, cognitive load theory, andragogy, and gamification, as the basis for the pedagogical concept of creating a system of interactive simulation training devices for carrying out supervisory and preventive activities in the field of fire safety. The key principles of the system concept are presented, and the main approaches to its implementation, including the architecture, are defined. The expected educational results of implementing the concept in the educational process are formulated.

Application field of research. The research results obtained can be applied in developing scientific and methodological support aimed at forming the supervisory and legal competence of specialists in state fire supervision authorities.

Keywords: contextual learning, problem based learning, cognitive load theories, andragogy, gamification, professional competencies, state fire supervision authorities, simulation trainers, information technologies.

(The date of submitting: November 10, 2025)

REFERENCES

1. Verbitskiy A.A. *Aktivnoe obuchenie v vysshey shkole: kontekstnyy podkhod* [Active learning in higher education: a contextual approach]: methodological guide. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 207 p. (rus)
2. Vakhitova G.Kh. Kvaziprofessional'naya deyatelnost' v podgotovke budushchikh spetsialistov predshkol'nogo obrazovaniya [Quasiprofessional activities in the training of future specialists of preschool education]. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2016. No. 5 (170). Pp. 64–66. (rus). EDN: XVKNLL.
3. Kuzevanova E.V. Rol' kvaziprofessional'noy deyatelnosti v aktualizatsii tvorcheskoy samorealizatsii bakalvrov PedVUZa [The role of quasi-professional activity in actualizing the creative self-realization of teachers of pedagogical university]. *Siberian Pedagogical Journal*, 2013. No 6. Pp. 148–152. (rus). EDN: RPVMVD.
4. Palevoda I.I., Korotkevich S.G., Nekhan D.S., Kovtun V.A., Surikov A.V., Ryabtsev V.N. Metodologiya razrabotki obuchayushchego trenazhera dlya podgotovki spetsialistov organov gosudarstvennogo pozharnogo nadzora s primeneniem tekhnologii virtual'noy real'nosti [Methodology of development of a training simulator for preparing specialists of state fire supervision bodies with the use of virtual reality technology]. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 2. Pp. 184–202. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.184. EDN: FQKMYK.
5. Batyaeva Ye.Kh., Kim T.V., Baryshnikova I.A., Salkkhova Ye.Yu., Rogova N.R., Przhanova A.A., Nkkolaeva T.L. Problemno-orientirovannoe obuchenie: sushchnost', nedostatki, preimushchestva [Problem-based learning: essence, disadvantages, advantages]. *Meditsina i ekologiya*, 2016. No. 1. Pp. 115–119. (rus). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemno-orientirovannoe-obuchenie-suschnost-nedostatki-preimushchestva> (accessed: November 05, 2025).
6. Tambieva M.D., Bidzhiev Z.A.D., Gochiyaeva D.A.M. Problemno-orientirovannoe obuchenie inostrannomu yazyku [Problem oriented foreign language teaching]. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya*, 2023. No 80-3. Pp. 265–267. (rus). EDN: IJMTLM.
7. Dushkin A.S., Zhuravleva T.L., Nimirovskaya YU.K. Realizatsiya problemno-orientirovannogo i proektno-orientirovannogo obucheniya v professional'noy perepodgotovke nachinayushchikh prepodavateley obrazovatel'nykh organizatsiy MVD Rossii [Implementation of problem-oriented and project-oriented training in the professional retraining of novice teachers of the educational organizations of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. *Bulletin of UFA Law Institute of MIA of Russia*, 2022. No. 1 (95). Pp. 148–155. (rus). EDN: YINQDV.

8. Sweller J. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Cognitive Science*, 1988. Vol. 12, No 2. Pp. 257–285.
9. Sweller J., Ayres P., Kalyuga S. *Cognitive load theory*. New York: Springer, 2011. 291 p. (Series: Explorations in the Learning Sciences, Instructional Systems and Performance Technologies (LSIS, vol. 1)). DOI: 10.1007/978-1-4419-8126-4.
10. Cowan N. The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 2001. Vol. 24, No. 1. Pp. 87–114. DOI: 10.1017/s0140525x01003922.
11. Kozlachkov V.I. *Tipovaya i risk-orientirovannaya modeli nadzornoj deyatel'nosti v oblasti obespecheniya pozharnoy bezopasnosti. Sravnitel'nyy analiz* [Standard and risk oriented models of supervisory activities in the field of fire safety. Comparative analysis]: monograph. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2016. 328 p. (rus). EDN: WAWXQB.
12. Surikov A.V., Zaynudinova N.V., Barysh S.A. Informatsionnaya kontseptual'naya model' professional'noy deyatel'nosti dolzhnostnykh lits organov gosudarstvennogo pozharnogo nadzora pri osushchestvlenii nadzorno-profilakticheskikh meropriyatiy (na primere organizatsii provedeniya monitoringa) [Information conceptual model of professional activity of officials of state fire supervision when implementing supervision and prevention measures (based on the example of organizing monitoring)]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 2. Pp. 233–245. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-2.233. EDN: ZHXRWB.
13. Kukuev A.I. Andragogika v izlozhenii posledovateley Malkolma Sh. Noulza [Andragogy as presented by Malcolm S. Knowles' followers]. *Psikhologiya i pedagogika: metodika i problemy prakticheskogo primeneniya*, 2008. No. 4-1. Pp. 210–216. (rus). EDN: RUMLBN.
14. Shelemet'eva V.A. Printsipy andragogicheskogo podkhoda v razrabotke elektronnykh uchebnykh kursov [Principles andragogical approach in developing e-learning courses]. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya*, 2019. No. 62-2. Pp. 248–250. (rus). EDN: YXUTMT.
15. Vyleshanina O.E., Bavtrusheva M.V. Sravnitel'nyy analiz pedagogicheskoy i andragogicheskoy modeley obucheniya [Comparative analysis of pedagogical and andragogical patterns of education]. *Journal of the Grodno State Medical University*, 2009. No. 1 (25). Pp. 141–144. (rus). EDN: QBFKJD.
16. Suykova O.A. Andragogicheskie printsipy v realizatsii nepreryvnogo obrazovaniya vzroslykh [Andragogical principles in the implementation of continuing adult education]. *Scientific Support of a System of Advanced Training*, 2018. No. 4 (37). Pp. 61–67. (rus). EDN: VTXRMK.
17. Zakalinskaya K.V., Surikov A.V., Zaynudinova N.V. Primenenie mobil'nykh tekhnologiy dlya formirovaniya kul'tury bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti u detey mladshego shkol'nogo vozrasta: opyt razrabotki i otsenki [The use of mobile technologies to develop a culture of life safety in primary school children: experience of development and evaluation]. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 3. Pp. 325–334. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-3.325. EDN: OBLPGT

Copyright © 2026 Surikov A.V., Zaynudinova N.V., Dovnar T.A., Zholnerchik V.V.

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. 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»;
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики, применяемых на БелАЭС»;
- «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 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);
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Охрана труда»;
- «Защита от чрезвычайных ситуаций»;
- «Противодействие коррупции»;
- «Реагирование на инциденты с наличием химических, биологических, радиоактивных и ядерных веществ».

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 легкобросываемых 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, 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 10, № 1, 2026

Подписано в печать 25.02.2026.
Формат 60×84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 19,07. Уч.-изд. л. 17,97.
Тираж 35 экз. Заказ 005-2026.

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 01.10.2025.
Ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск.