



Основан в 2016 году

Выходит 4 раза в год

Научный журнал
Вестник
Университета гражданской защиты
МЧС Беларуси
(Journal of Civil Protection)
Том 9, № 1, 2025

Редакционная коллегия:

главный редактор:

Полевода
Иван Иванович

доктор технических наук,
доцент

зам. главного редактора:

Гончаренко
Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Платонов
Александр Сергеевич

кандидат физико-математических
наук, доцент

Редакционный совет:

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

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

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

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

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

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

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

Статьи, поступающие для публикации в журнале, рецензируются.

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

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

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

+37517 341-32-99

Сайт Университета гражданской защиты: www.ucsp.by

Email редакции: vestnik@ucsp.by

ISSN 2519-237X (print)

ISSN 2708-017X (online)

© Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Пожаробезопасность и взрывозащита. Огнестойкость строительных материалов

Пастухов С.М., Платонов А.С., Тетерюков А.В., Дробыш А.С. Математическая модель определения углового коэффициента облученности для расчета плотности теплового потока, приходящего от излучателя плоской формы..... 5

Нехань Д.С., Полевода И.И., Зайнудинова Н.В., Ивлев Ю.П., Ботян С.С., Лишай И.Л. Критерии выбора типовых представителей железобетонных изделий для проведения сертификационных испытаний на огнестойкость 23

Ботян С.С., Нехань Д.С., Полевода И.И., Шатило Э.Э. Методология оценки влияния конструктивных решений фасадов зданий на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи 41

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

Камлюк А.Н. Подходы к расчету кратности, дисперсности и устойчивости воздушно-механических пен низкой кратности 54

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

Фомихина И.В., Бирюк В.А., Маркова Л.В. Исследование структуры и свойств конструкционных сталей разрушенных деталей нефтебурового оборудования..... 66

Аушев И.Ю., Фомихина И.В., Веренич Е.В., Рыжов М.Э. Изменение микроструктуры металлических элементов многожильных кабельных изделий при воздействии пламени..... 81

Крецу Р.М., Рыбаков А.В. Методические основы интеграции проектного менеджмента в управление рисками чрезвычайных ситуаций 94

Аушев И.Ю., Иванистов А.С. Обеспечение взрывобезопасности объектов хранения и переработки зерна на примере КУП «Горецкий элеватор»..... 109

Научное обеспечение гражданской защиты

Хроколов В.А. Компьютерная программа поддержки принятия решения начальника пожарной аварийно-спасательной службы на проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ 119

История и развитие пожарно-спасательной службы. Культура безопасности жизнедеятельности

Кудряшов А.Н., Галалюк С.С. К 100-летию со дня основания Белорусского добровольного пожарного общества..... 128

Правила предоставления статей 131

CONTENTS

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

Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Mathematical model for determining the angular irradiation coefficient for calculating the heat flux density coming from a plane-shaped emitter. 5

Nekhan' D.S., Palevoda I.I., Zaynudinova N.V., Ivlev Yu.P., Botyan S.S., Lishay I.L. Criteria for selecting typical representatives of reinforced concrete products for certification fire resistance tests 23

Botyan S.S., Nekhan' D.S., Palevoda I.I., Shatilo E.E. Methodology for assessing the impact of building facade design on fire propagation through exterior envelopes to overlying floors..... 41

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

Kamlyuk A.N. Approaches to calculating the expansion, dispersion and stability of low expansion air-mechanical foams..... 54

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

Fomikhina I.V., Biruk V.A., Markova L.V. Investigation of the structure and properties of structural steels of destroyed oil drilling equipment parts..... 66

Aushev I.Yu., Fomikhina I.V., Verenich E.V., Ryzhov M.E. Changes in the microstructure of metallic elements of multi-core cable products when exposed to flame..... 81

Kretsu R.M., Rybakov A.V. Methodological basis of the integration of project management into emergency risk management 94

Aushev I.Yu., Ivanistov A.S. Ensuring explosion safety of grain storage and processing facilities on the example of the Municipal Unitary Enterprise «Goretsky elevator»..... 109

Scientific support of civil defense

Khrokolov V.A. Computer programme to support the decision of the head of the fire emergency rescue service to carry out emergency rescue and other urgent works..... 119

History and development of fire and rescue service. Life safety culture

Kudryashov A.N., Galalyuk S.S. To the 100th anniversary of the founding of the Belarusian Volunteer Firefighting Society..... 128

Rules of submitting articles for publication 131

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОБЛУЧЕННОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА, ПРИХОДЯЩЕГО ОТ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ

Пастухов С.М., Платонов А.С., Тетерюков А.В., Дробыш А.С.

Цель. Разработать универсальную математическую модель оценки углового коэффициента облученности, учитывающую пространственное расположение излучающей и принимающей поверхностей, когда первая из них представлена произвольным многоугольником.

Методы. Разработка модели основывалась на существующих теоретических подходах в области радиационного теплообмена, геометрии возможного взаимного расположения поверхностей и результатах натуральных экспериментов. Также использовались численные методы для проверки адекватности аналитических выражений.

Результаты. Получены универсальные аналитические выражения для определения углового коэффициента облученности для излучающей поверхности произвольной многоугольной формы, расположенной под произвольным углом к принимающей поверхности. Разработанные выражения учитывают индивидуальные геометрические особенности объектов и взаимное расположение излучающей и принимающей поверхностей, обеспечивая повышение точности расчетов теплового воздействия на соседние здания и сооружения.

Область применения исследований. Определение величины противопожарных разрывов между зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов, с учетом их пространственного расположения и геометрических особенностей конструкций. Модель может использоваться при проектировании и оценке пожарной безопасности зданий и сооружений в условиях плотной городской и сельской застройки.

Ключевые слова: противопожарный разрыв, геометрические параметры пламени, угловой коэффициент облученности, горючие кровельные материалы, тепловое излучение.

(Поступила в редакцию 13 января 2025 г.)

Введение

Определение противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями является одной из ключевых задач при проектировании объектов в условиях плотной городской и сельской застройки. Противопожарные разрывы обеспечивают снижение риска передачи тепловой энергии от горящего здания к соседнему объекту, что играет критически важную роль в предотвращении распространения пожара [1, с. 312; 2, с. 177]. Таким образом, важной задачей является разработка методов определения плотности теплового потока, падающего на облучаемую поверхность, учитывающих индивидуальные геометрические параметры зданий, а также их взаимное расположение.

Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на величину противопожарного разрыва, является угловой коэффициент облученности [3]. Данный параметр характеризует степень теплового воздействия, передаваемого между излучающей и принимающей поверхностями. Он учитывает как геометрические параметры излучающей поверхности, так и взаимное расположение объектов в пространстве. Особую сложность представляет собой моделирование углового коэффициента облученности для излучающих поверхностей сложной формы.

Существующие методы оценки углового коэффициента облученности ограничены простыми геометрическими формами излучающей поверхности и частными случаями взаимного расположения поверхностей [2, с. 186–191; 4], что снижает их применимость. Поэтому актуальной задачей является разработка универсальной модели, учитывающей произвольную геометрию излучающей поверхности и ее пространственное расположение.

Анализ методик. Современные методы расчета противопожарных разрывов сталкиваются с ограниченной применимостью из-за упрощений, используемых при выборе формы и размеров излучающих поверхностей, что существенно влияет на точность определения углового коэффициента облученности [3]. В большинстве подходов, изложенных в СН 2.01.03-2019¹, СТБ 11.05.03-2010², а также методах, предложенных М.Я. Ройтманом [1, с. 317–341], D. Drysdale [5, с. 53–74], В. Karlsson и J. Quintiere [6, с. 171–184], E. Carlsson [7, с. 9–14] и В.Ф. Кудаленкиным [2, с. 179–194], излучающая поверхность рассматривается в виде прямоугольника. Однако в реальных условиях геометрия пламени часто выходит за рамки простой прямоугольной формы, что требует более адаптивных методов для корректного учета параметров пламени при расчете углового коэффициента облученности.

Методы В. Karlsson и J. Quintiere [6, с. 183], а также В.Ф. Кудаленкина [2, с. 188–190] расширяют спектр геометрических форм, включая треугольные, трапециевидные, секторальные и круговые излучающие поверхности. Несмотря на это, их применение ограничено строгими требованиями к взаимному расположению поверхностей, что снижает универсальность расчетных моделей.

Одним из примеров аналитического моделирования является работа J.L. Rossi и его соавторов [8], в которой представлена модель расчета углового коэффициента в условиях природных пожаров. Здесь пламя представлено в виде наклонного прямоугольника, что позволяет учитывать наклон фронта пламени под воздействием ветра или рельефа. Такой подход, аналогичный методам СН 2.01.03-2019¹, обеспечивает более точное соответствие реальным условиям и упрощает вычисления, хотя его применение остается ограниченным упрощенными геометрическими параметрами излучающей поверхности. Схожая методика определения углового коэффициента облученности для плоского протяженного теплового источника изложена в статье [9].

Исследования А.Н. Макарова [10] были направлены на усовершенствование расчетов углового коэффициента облученности с учетом цилиндрической формы излучающей поверхности для более точного моделирования радиационного теплообмена в печах, топках и камерах сгорания. Автор рассмотрел изотермические цилиндрические слои, составляющие пламя, с целью повышения точности расчетов тепловых потоков и оптимизации теплотехнических характеристик оборудования. Предложенные методы обеспечивают более точное моделирование теплообмена и повышают эффективность расчета теплотехнического оборудования. Методики, представленные М. Shokri и С.L. Beyler [11], К.S. Mudan [12] и ГОСТ Р 12.3.047-2012³, также рассматривают цилиндрическую форму пламени, при этом последние две дополнительно учитывают влияние ветра на отклонение излучающей поверхности.

Определение углового коэффициента облученности для осесимметричных форм пламени рассматривается в методике, изложенной А.Т. Modak [13]. Данный подход не только применим к простейшим объемным фигурам (цилиндр, конус), но и позволяет рассчитывать

¹ Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 2.01.03-2019. – Введ. 16.12.2019. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – 38 с.

² Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03-2010. – Введ. 28.04.2010. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2010. – 76 с.

³ Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Национальный стандарт Российской Федерации: ГОСТ Р 12.3.047-2012. – Взамен ГОСТ Р 12.3.047-98. – Введ. 01.01.2014. – М.: Приказ Росстандарта от 27.12.2012 № 1971-ст. – 62 с.

и другие осесимметричные моды деформации фронта пламени. Исследования подтверждены экспериментально и пригодны для анализа горения различных материалов, что делает ее полезной для прогнозирования пожарных рисков и проектирования систем противопожарной защиты, однако имеются ограничения: модель не учитывает фактическую форму пламени и его наклон, что может существенно повлиять на точность расчетов, особенно для реальных условий.

Математическая модель определения углового коэффициента облученности, предложенная в статье [3], позволяет рассчитать параллельное расположение поверхностей, которые могут быть размещены произвольно относительно друг друга. Важным преимуществом данной модели является учет сложной формы излучающей поверхности, что значительно расширяет ее применимость в реальных условиях. Однако модель имеет ограничение: она не позволяет определять угловой коэффициент облученности в случаях перпендикулярного излучения или при расположении поверхностей под углом, что снижает ее применимость в этих случаях. Экспериментальные исследования [14] подтвердили, что форма пламени может быть представлена как сложный многоугольник в пространстве.

Таким образом, актуальной задачей является создание математической модели, учитывающей многоугольную форму излучающей поверхности и ее пространственное расположение, что повысит точность анализа радиационного теплообмена в сложных геометрических конфигурациях.

Основная часть

Угловой коэффициент – отношение энергии, попадающей на площадку, к энергии, излучаемой поверхностью [15, с. 131; 16, с. 109–111]. Для излучающей поверхности конечных размеров площадью F_2 и облучаемой элементарной площадкой площадью dF_1 угловой коэффициент $d\varphi_{F_2-dF_1}$ определяется по формуле:

$$d\varphi_{F_2-dF_1} = \frac{d\Phi_1}{\Phi_2},$$

где Φ_2 – тепловой поток, излучаемый поверхностью F_2 ;

$d\Phi_1$ – часть теплового потока Φ_2 , попадающего на элементарную площадку dF_1 .

Если поверхность F_2 является ламбертовым источником (плотность потока испускаемого излучения равномерно распределена по поверхности) угловой коэффициент выражается формулой [16, с. 109–112, ф-ла (4-14)]:

$$d\varphi_{F_2-dF_1} = \frac{d\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{dF_1}{F_2} \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_2 = \frac{dF_1}{F_2} \alpha_{2-1}, \quad (1)$$

где

$$\alpha_{2-1} = \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_2, \quad (2)$$

При определении противопожарных разрывов необходимо знать плотность теплового потока q_1 , падающего на элементарную площадку dF_1 :

$$q_1 = \frac{d\Phi_1}{dF_1} = \frac{\Phi_2}{F_2} \alpha_{2-1} = q_2 \alpha_{2-1},$$

где q_2 – плотность теплового потока, излучаемого поверхностью F_2 .

Как видно из последней формулы α_{2-1} , есть отношение плотности теплового потока, падающего на элементарную площадку dF_1 , к плотности теплового потока, излучаемого поверхностью F_2 : $\alpha_{2-1} = q_1 / q_2$.

Отношение потока излучения, падающего на малый участок поверхности, к площади этого участка – это облученность (энергетическая освещенность). Поэтому α_{2-1} называют угловым коэффициентом облученности.

В работах [15, с. 141–144] и [16, с. 116–123] представлен подход к определению угловых коэффициентов, основанный на переходе от интеграла по поверхности к криволинейному интегралу по контуру поверхности в соответствии с классической формулой Стокса [16, с. 116]. Этот метод представляется удобным, поскольку позволяет снизить кратность интегрирования. В результате указанного перехода угловой коэффициент облученности α_{2-1} может быть вычислен по формуле:

$$\alpha_{2-1} = \frac{l_1}{2\pi} \oint_{\Gamma_2} \frac{(z_2 - z_1) dy_2 - (y_2 - y_1) dz_2}{r^2} + \frac{m_1}{2\pi} \oint_{\Gamma_2} \frac{(x_2 - x_1) dz_2 - (z_2 - z_1) dx_2}{r^2} + \frac{n_1}{2\pi} \oint_{\Gamma_2} \frac{(y_2 - y_1) dx_2 - (x_2 - x_1) dy_2}{r^2}, \quad (3)$$

где Γ_2 – контур, ограничивающий поверхность F_2 ;

l_1, m_1, n_1 – направляющие косинусы нормали к элементарной площадке dF_1 ;

(x_1, y_1, z_1) – точка, совпадающая с центром элементарной площадки dF_1 поверхности F_1 ;

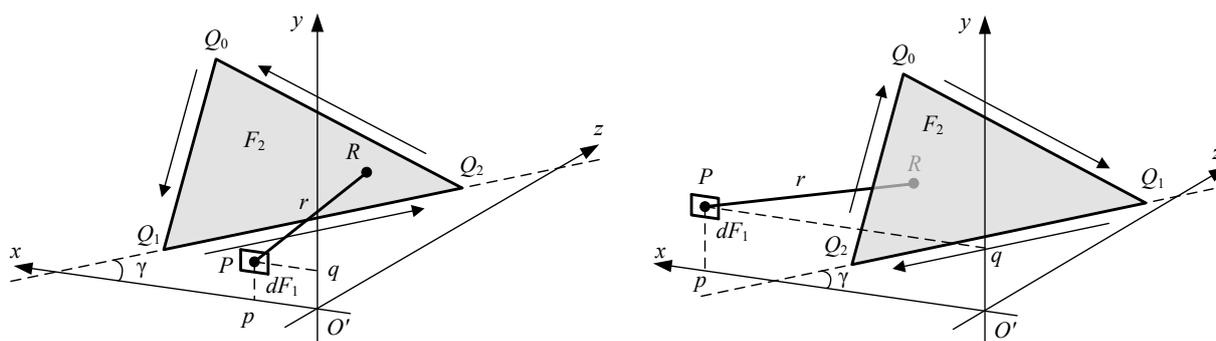
(x_2, y_2, z_2) – точка конечной поверхности F_2 ;

r – расстояние между этими точками.

Будем полагать, что элементарная площадка dF_1 лежит в плоскости $O'xy$. При этом оси координат ориентируем таким образом, чтобы направление нормали к dF_1 , по которому dF_1 смотрит на поверхность F_2 , совпадало с осью аппликат $O'z$ (рис. 1). В таком случае вектором направляющих косинусов нормали к элементарной площадке dF_1 окажется

$$(l_1, m_1, n_1) = (0, 0, 1). \quad (4)$$

Отметим также, что в такой конфигурации контур Γ_2 , ограничивающий поверхность F_2 , обходится в направлении, при котором видимая со стороны dF_1 поверхность F_2 всегда находится слева (т.е. против часовой стрелки).



а – вид поверхности F_2 со стороны площадки dF_1 в случае острого угла между ними ($p < n / \sin \gamma$)

б – вид поверхности F_2 со стороны площадки dF_1 в случае тупого угла между ними ($p > n / \sin \gamma$)

Рисунок 1. – Взаимное расположение элементарной площадки dF_1 и поверхности F_2 в случае острого угла между F_2 и отрицательным направлением оси абсцисс

Сформулируем условия поставленной задачи:

– излучающая поверхность F_2 является произвольным многоугольником с конечным числом последовательно занумерованных при движении против часовой стрелки вершин $Q_0, Q_1, \dots, Q_{n-1}, Q_n = Q_0$. При этом любые не имеющие общих концов отрезки $Q_{i-1}Q_i$ и $Q_{j-1}Q_j$, составляющие границу Γ_2 , не пересекаются;

– плоскости излучающей и принимающей поверхностей располагаются под любым углом;

– центр элементарной площадки dF_1 лежит в произвольной точке $P(p, q, 0)$ плоскости $O'xy$ (плоскости принимающей поверхности).

Очевидно, что если перед дальнейшими рассуждениями начало координат O' переместить в точку $P(p, q, 0)$ (центр площадки dF_1), то с учетом равенства (4) формула (3) примет вид:

$$\alpha_{2-1} = \frac{1}{2\pi} \oint_{\Gamma_2} \frac{ydx - xdy}{r^2}, \quad (5)$$

где (x, y, z) – точка конечной поверхности F_2 в новой системе координат Oxy ($O=P$):

$$x = x_2 - p; \quad y = y_2 - q; \quad z = z_2. \quad (6)$$

А в силу того, что $\Gamma_2 = Q_0Q_1 + Q_1Q_2 + \dots + Q_{n-1}Q_n$, а $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, из (5) получим

$$\alpha_{2-1} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{2\pi} \int_{Q_{j-1}Q_j} \frac{ydx - xdy}{x^2 + y^2 + z^2} \right)^{\text{обозн.}} \equiv \sum_{j=1}^n I_j. \quad (7)$$

Рассмотрим теперь различные случаи вычисления углового коэффициента облученности α_{2-1} в зависимости от величины угла между излучающей и принимающей поверхностями.

1. Случай острого угла между излучающей поверхностью F_2 и отрицательным направлением оси абсцисс. Расположим начало координат O' так, чтобы поверхность F_2 , образующая с отрицательным направлением оси Ox угол $\gamma \in (0, \pi/2)$, оказалась в первом октанте ($x > 0, y > 0, z > 0$). Для однозначного определения координат точек поверхности F_2 положим, что опущенная из начала координат O' нормаль к плоскости излучающей поверхности имеет длину n .

В целях упрощения изображения взаимного расположения элементарной площадки dF_1 и поверхности F_2 представим излучающую поверхность в виде произвольного треугольника $Q_0Q_1Q_2$ с горизонтальным основанием, лежащим в координатной плоскости Oxz (рис. 1). Отметим, что такая форма F_2 соответствует случаю определения углового коэффициента облученности при горении фронтона двускатной кровли, выполненной из горючих материалов.

Учтем, что при $p < n / \sin \gamma$ излучающая поверхность F_2 и элементарная площадка dF_1 образуют острый угол (рис. 1а), а при $p > n / \sin \gamma$ – тупой угол (рис. 1б). При этом поверхность F_2 с элементарной площадки dF_1 видна с противоположных сторон (сравните направления обхода контура Γ_2 для острого (рис. 1а) и тупого (рис. 1б) углов между F_2 и dF_1).

Выразим значение входящего в формулу (7) криволинейного интеграла I_j через угол γ , длину нормали n , координаты точки Q_{j-1} и линейные размеры отрезка $Q_{j-1}Q_j$ как части плоскости излучающей поверхности. Последнее удобно, т.к. при практических расчетах размеры излучающей поверхности считаются известными.

Итак, рассмотрим произвольный линейный участок $Q_{j-1}Q_j$ контура Γ_2 , обход по которому осуществляется в направлении от Q_{j-1} к Q_j (рис. 2). Пусть проекция точки Q_{j-1} на плоскость $O'xy$ (плоскость принимающей поверхности) есть точка $Q'(k, m, 0)$, тогда из простых геометрических соображений следует, что аппликата точки Q_{j-1} равна $z_{j-1} = n / \cos \gamma - k \operatorname{tg} \gamma$.

Далее введем в рассмотрение следующие скалярные величины:

u – проекция направленного отрезка $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ на горизонталь плоскости излучающей поверхности, которая принимает положительные значения, если проекция $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ на ось Ox сонаправлена с ней, и отрицательные – в противном случае (например, для изображенного на рисунке 2 случая $u > 0$);

v – проекция направленного отрезка $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ на вертикаль плоскости излучающей поверхности (на ось Oy), которая принимает положительные значения, если эта проекция

$\overline{Q_{j-1}Q_j}$ сонаправлена с осью $O'y$, и отрицательные – в противном случае (например, для изображенного на рисунке 2 случая $v < 0$).

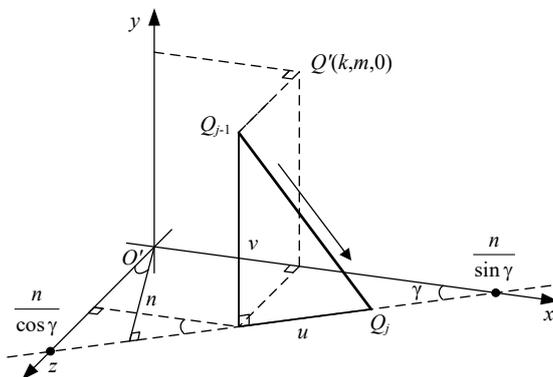


Рисунок 2. – Схема определения координат концов отрезка $Q_{j-1}Q_j$ в случае острого угла между F_2 и отрицательным направлением оси абсцисс

Очевидно, что в этих обозначениях имеем:

$$Q_j = Q_{j-1} + \overline{Q_{j-1}Q_j} = Q_{j-1} + (\overline{u \cos \gamma, v, -u \sin \gamma}).$$

Откуда с учетом (6) следует, что после переноса начала координат O' в точку $P(p, q, 0)$ концы отрезка $Q_{j-1}Q_j$ будут иметь координаты

$$Q_{j-1} \left(k - p, m - q, \frac{n - k \sin \gamma}{\cos \gamma} \right) \text{ и } Q_j \left(k - p + u \cos \gamma, m - q + v, \frac{n - k \sin \gamma}{\cos \gamma} - u \sin \gamma \right), \quad (8)$$

а его уравнение в параметрической форме – вид:

$$Q_{j-1}Q_j: \begin{cases} x = t \cdot u \cos \gamma + (k - p); \\ y = t \cdot v + (m - q); \\ z = -t \cdot u \sin \gamma + (n - k \sin \gamma) / \cos \gamma, \end{cases} \quad \text{где } t \text{ изменяется от } 0 \text{ до } 1. \quad (9)$$

Подставив (9) в определенное формулой (7) выражение криволинейного интеграла I_j , получим:

$$I_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{[t \cdot v + (m - q)] \cdot u \cos \gamma - [t \cdot u \cos \gamma + (k - p)] \cdot v}{[t \cdot u \cos \gamma + (k - p)]^2 + [t \cdot v + (m - q)]^2 + [-t \cdot u \sin \gamma + (n - k \sin \gamma) / \cos \gamma]^2} dt. \quad (10)$$

С помощью простых, но громоздких преобразований можно показать, что формула (10) представима в виде

$$I_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{\lambda dt}{(t + \mu)^2 + \eta^2} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{\eta} \left(\arctg \frac{1 + \mu}{\eta} - \arctg \frac{\mu}{\eta} \right), \quad (11)$$

где

$$\begin{cases} \lambda = \frac{u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p)}{u^2 + v^2}; \\ \mu = \frac{u \cdot (k - p \cos^2 \gamma - n \sin \gamma) + v \cdot (m - q) \cos \gamma}{(u^2 + v^2) \cos \gamma}; \\ \eta^2 = \frac{(u^2 + v^2) \cdot (p \sin \gamma - n)^2 \cos^2 \gamma + [u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p \cos^2 \gamma - n \sin \gamma)]^2}{[(u^2 + v^2) \cdot \cos \gamma]^2}. \end{cases} \quad (12)$$

Преобразуем (11) и (12) к более удобному для вычислений виду:

$$I_j = \frac{1}{2\pi} \frac{\phi}{\omega} \left(\operatorname{arctg} \frac{\chi + \psi}{\omega} - \operatorname{arctg} \frac{\psi}{\omega} \right), \quad (13)$$

где

$$\begin{cases} \phi = [u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p)] \cos \gamma; \\ \chi = (u^2 + v^2) \cos \gamma; \\ \psi = u \cdot (k - p \cos^2 \gamma - n \sin \gamma) + v \cdot (m - q) \cos \gamma; \\ \omega = \sqrt{(u^2 + v^2) \cdot (p \sin \gamma - n)^2 \cos^2 \gamma + [u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p \cos^2 \gamma - n \sin \gamma)]^2}. \end{cases} \quad (14_{\text{н}})$$

Очевидно, что формулы (14_н) значительно упростятся, если отрезок $Q_{j-1}Q_j$ окажется горизонтальным или вертикальным. Действительно, для горизонтального $Q_{j-1}Q_j$ ($v = 0$) будем иметь:

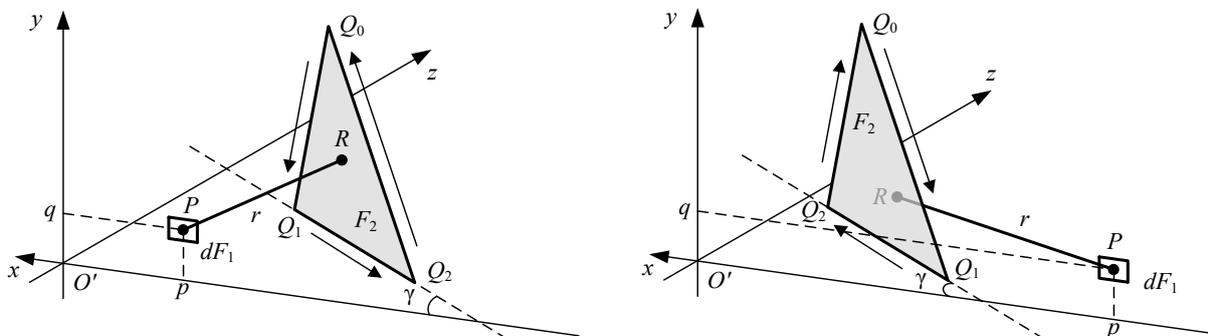
$$\begin{cases} \phi = (m - q) \cos^2 \gamma; \\ \chi = u \cdot \cos \gamma; \\ \psi = k - p \cos^2 \gamma - n \sin \gamma; \\ \omega = \sqrt{(p \sin \gamma - n)^2 + (m - q)^2} \cdot \cos \gamma, \end{cases} \quad (14_{\text{г}})$$

а для вертикального $Q_{j-1}Q_j$ ($u = 0$):

$$\begin{cases} \phi = -(k - p) \cos \gamma; \\ \chi = v \cdot \cos \gamma; \\ \psi = (m - q) \cos \gamma; \\ \omega = \sqrt{(k - p)^2 \cos^2 \gamma + (k \sin \gamma - n)^2}. \end{cases} \quad (14_{\text{в}})$$

2. Случай острого угла между излучающей поверхностью F_2 и положительным направлением оси абсцисс. Расположим начало координат O' так, чтобы поверхность F_2 , образующая с положительным направлением оси Ox угол $\gamma \in (0, \pi/2)$, оказалась в пятом октанте ($x < 0, y > 0, z > 0$). Как и выше, для однозначного определения координат точек поверхности F_2 положим, что опущенная из начала координат O' нормаль к плоскости излучающей поверхности имеет длину n .

При $p > n / \sin \gamma$ излучающая поверхность F_2 и элементарная площадка dF_1 образуют острый угол (рис. 3а), а при $p < n / \sin \gamma$ – тупой угол (рис. 3б).



а – вид поверхности F_2 со стороны площадки dF_1 в случае острого угла между ними ($p > n / \sin \gamma$)

б – вид поверхности F_2 со стороны площадки dF_1 в случае тупого угла между ними ($p < n / \sin \gamma$)

Рисунок 3. – Взаимное расположение элементарной площадки dF_1 и поверхности F_2 в случае острого угла между F_2 и положительным направлением оси абсцисс

Как и в предыдущем варианте, положим, что проекция точки Q_{j-1} на плоскость $O'xy$ есть точка $Q'(k, m, 0)$, тогда из простых геометрических соображений следует, что аппликата точки Q_{j-1} равна $z_{j-1} = n / \cos \gamma + k \operatorname{tg} \gamma$. Отметим, что для изображенного на рисунке 4 случая расположения отрезка $Q_{j-1}Q_j$ обе скалярные величины u и v отрицательны.

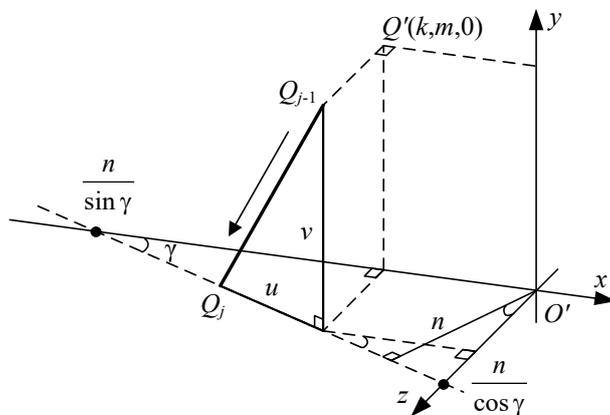


Рисунок 4. – Схема определения координат концов отрезка $Q_{j-1}Q_j$ в случае острого угла между F_2 и положительным направлением оси абсцисс

Для рассматриваемого расположения плоскости излучающей поверхности имеем

$$Q_j = Q_{j-1} + \overline{Q_{j-1}Q_j} = Q_{j-1} + \overline{(u \cos \gamma, v, u \sin \gamma)}.$$

Следовательно, в силу (4) после переноса начала координат O' в точку $P(p, q, 0)$ концы отрезка $Q_{j-1}Q_j$ будут иметь координаты

$$Q_{j-1} \left(k - p, m - q, \frac{n + k \sin \gamma}{\cos \gamma} \right) \text{ и } Q_j \left(k - p + u \cos \gamma, m - q + v, \frac{n + k \sin \gamma}{\cos \gamma} + u \sin \gamma \right), \quad (15)$$

а его уравнение в параметрической форме – вид:

$$Q_{j-1}Q_j: \begin{cases} x = t \cdot u \cos \gamma + (k - p); \\ y = t \cdot v + (m - q); \\ z = t \cdot u \sin \gamma + (n + k \sin \gamma) / \cos \gamma, \end{cases} \quad \text{где } t \text{ изменяется от } 0 \text{ до } 1. \quad (16)$$

Подставив (16) в определенное формулой (7) выражение криволинейного интеграла I_j , получим:

$$I_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{[t \cdot v + (m - q)] \cdot u \cos \gamma - [t \cdot u \cos \gamma + (k - p)] \cdot v}{[t \cdot u \cos \gamma + (k - p)]^2 + [t \cdot v + (m - q)]^2 + [t \cdot u \sin \gamma + (n + k \sin \gamma) / \cos \gamma]^2} dt. \quad (17)$$

Снова с помощью простых, но громоздких преобразований можно показать, что (17) представима в виде формулы (11), в которой

$$\begin{cases} \lambda = \frac{u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p)}{u^2 + v^2}; \\ \mu = \frac{u \cdot (k - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma) + v \cdot (m - q) \cos \gamma}{(u^2 + v^2) \cos \gamma}; \\ \eta^2 = \frac{(u^2 + v^2) \cdot (p \sin \gamma + n)^2 \cos^2 \gamma + [u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma)]^2}{[(u^2 + v^2) \cdot \cos \gamma]^2}. \end{cases} \quad (18)$$

Криволинейный интеграл I_j будет удобнее вычислять по преобразованной формуле (13), в которой

$$\begin{cases} \phi = [u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p)] \cos \gamma; \\ \chi = (u^2 + v^2) \cos \gamma; \\ \psi = u \cdot (k - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma) + v \cdot (m - q) \cos \gamma; \\ \omega = \sqrt{(u^2 + v^2) \cdot (p \sin \gamma + n)^2 \cos^2 \gamma + [u \cdot (m - q) \cos \gamma - v \cdot (k - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma)]^2}. \end{cases} \quad (19_{\text{H}})$$

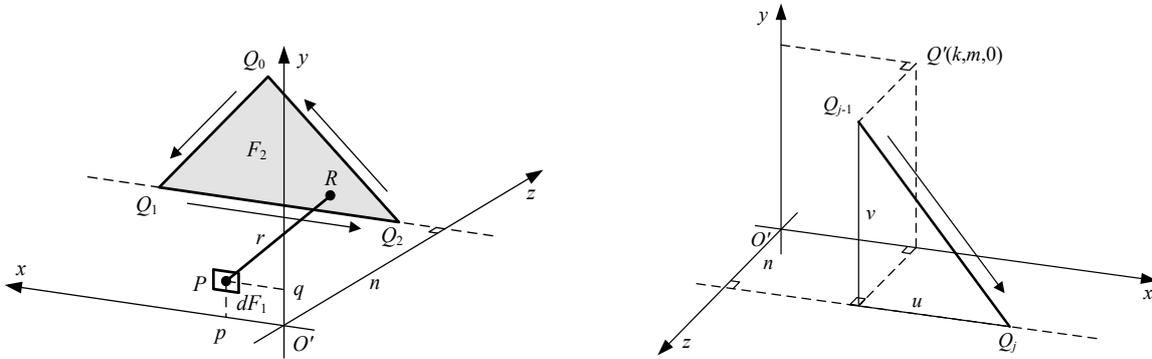
В частности, для горизонтального $Q_{j-1}Q_j$ ($v = 0$) будем иметь:

$$\begin{cases} \phi = (m - q) \cos^2 \gamma; \\ \chi = u \cdot \cos \gamma; \\ \psi = k - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma; \\ \omega = \sqrt{(p \sin \gamma + n)^2 + (m - q)^2} \cdot \cos \gamma, \end{cases} \quad (19_{\text{Г}})$$

а для вертикального $Q_{j-1}Q_j$ ($u = 0$):

$$\begin{cases} \phi = -(k - p) \cos \gamma; \\ \chi = v \cdot \cos \gamma; \\ \psi = (m - q) \cos \gamma; \\ \omega = \sqrt{(k - p)^2 \cos^2 \gamma + (k \sin \gamma + n)^2}. \end{cases} \quad (19_{\text{В}})$$

3. Случай параллельных излучающей и принимающей поверхностей. Положим, что расстояние между излучающей и принимающей поверхностями равно n (рис. 5а).



а – вид поверхности F_2 со стороны площадки dF_1 б – схема определения координат концов $Q_{j-1}Q_j$
Рисунок 5. – Взаимное расположение параллельных элементарной площадки dF_1 и поверхности F_2

Выразим значение входящего в формулу (7) криволинейного интеграла I_j через расстояние n между излучающей и принимающей поверхностями, координаты точки Q_{j-1} и линейные размеры отрезка $Q_{j-1}Q_j$ как части плоскости излучающей поверхности. Для рассматриваемого расположения плоскости излучающей поверхности (рис. 5б) имеем

$$Q_j = Q_{j-1} + \overrightarrow{Q_{j-1}Q_j} = Q_{j-1} + (u, v, 0).$$

Следовательно, в силу (6) после переноса начала координат O' в точку $P(p, q, 0)$ концы отрезка $Q_{j-1}Q_j$ будут иметь координаты

$$Q_{j-1}(k - p, m - q, n) \quad \text{и} \quad Q_j(k - p + u, m - q + v, n), \quad (20)$$

а его уравнение в параметрической форме – вид:

$$Q_{j-1}Q_j: \begin{cases} x = t \cdot u + (k - p); \\ y = t \cdot v + (m - q); \\ z = n, \end{cases} \quad \text{где } t \text{ изменяется от } 0 \text{ до } 1. \quad (21)$$

Подставив (21) в определенное формулой (7) выражение криволинейного интеграла I_j , получим:

$$I_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{[t \cdot v + (m - q)] \cdot u - [t \cdot u + (k - p)] \cdot v}{[t \cdot u + (k - p)]^2 + [t \cdot v + (m - q)]^2 + n^2} dt. \quad (22)$$

С помощью простых преобразований можно показать, что (22) можно переписать в виде формулы (11), в которой

$$\begin{cases} \lambda = \frac{u \cdot (m - q) - v \cdot (k - p)}{u^2 + v^2}; \\ \mu = \frac{u \cdot (k - p) + v \cdot (m - q)}{u^2 + v^2}; \\ \eta^2 = \frac{(u^2 + v^2) \cdot n^2 + [u \cdot (m - q) - v \cdot (k - p)]^2}{(u^2 + v^2)^2}. \end{cases} \quad (23)$$

Криволинейный интеграл I_j будет удобнее вычислять по преобразованной формуле (13), в которой

$$\begin{cases} \phi = u \cdot (m - q) - v \cdot (k - p); \\ \chi = u^2 + v^2; \\ \psi = u \cdot (k - p) + v \cdot (m - q); \\ \omega = \sqrt{(u^2 + v^2) \cdot n^2 + [u \cdot (m - q) - v \cdot (k - p)]^2}. \end{cases} \quad (24_{\text{н}})$$

В частности, для горизонтального $Q_{j-1}Q_j$ ($v = 0$) будем иметь:

$$\phi = m - q; \quad \chi = u; \quad \psi = k - p; \quad \omega = \sqrt{n^2 + (m - q)^2}. \quad (24_{\text{г}})$$

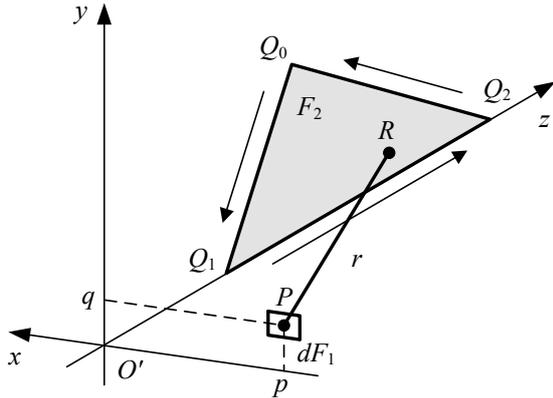
а для вертикального $Q_{j-1}Q_j$ ($u = 0$):

$$\phi = -(k - p); \quad \chi = v; \quad \psi = m - q; \quad \omega = \sqrt{n^2 + (k - p)^2}. \quad (24_{\text{в}})$$

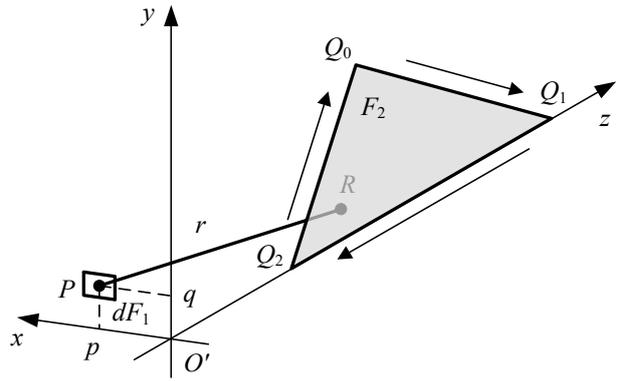
Заметим, что рассмотренное здесь расположение излучающей и принимающей поверхностей является частным случаем для двух рассмотренных выше вариантов. Действительно, положив $\gamma = 0$ в формулах (8)–(14) или (15)–(19), мы получим формулы (20)–(24).

4. Случай перпендикулярных излучающей и принимающей поверхностей. Расположим начало координат O' так, чтобы поверхность F_2 лежала в плоскости $O'zy$ (рис. 6). В выбранной системе координат при $p > 0$ элементарная площадка dF_1 находится справа от излучающей поверхности F_2 (рис. 6а), а при $p < 0$ – слева от нее (рис. 6б).

Выразим значение входящего в формулу (7) криволинейного интеграла I_j через координаты точки Q_{j-1} и линейные размеры отрезка $Q_{j-1}Q_j$ как части плоскости излучающей поверхности. Пусть начальная точка направленного отрезка $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ имеет координаты $Q_{j-1}(0, m, n)$.



а – вид поверхности F_2 со стороны расположенной слева площадки dF_1 ($p > 0$)



б – вид поверхности F_2 со стороны расположенной справа площадки dF_1 ($p < 0$)

Рисунок 6. – Вид поверхности F_2 со стороны параллельной ей площадки dF_1

Введем в рассмотрение скалярную величину w – проекцию направленного отрезка $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ на горизонталь плоскости излучающей поверхности (на ось Oz), которая принимает положительные значения, если эта проекция $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ сонаправлена с осью $O'z$, и отрицательные – в противном случае (например, для изображенного на рисунке 7 случая $w < 0$). В этих обозначениях имеем

$$Q_j = Q_{j-1} + \overline{Q_{j-1}Q_j} = Q_{j-1} + (0, v, w).$$

Следовательно, в силу (4) после переноса начала координат O' в точку $P(p, q, 0)$ концы отрезка $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ будут иметь координаты

$$Q_{j-1}(-p, m - q, n) \text{ и } Q_j(-p, m - q + v, n + w), \quad (25)$$

а его уравнение в параметрической форме – вид:

$$Q_{j-1}Q_j: \begin{cases} x = -p; \\ y = t \cdot v + (m - q); \\ z = t \cdot w + n, \end{cases} \text{ где } t \text{ изменяется от } 0 \text{ до } 1. \quad (26)$$

Подставив (21) в определенное формулой (7) выражение криволинейного интеграла I_j , получим:

$$I_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{p \cdot v}{p^2 + [t \cdot v + (m - q)]^2 + [t \cdot w + n]^2} dt. \quad (27)$$

С помощью простых преобразований можно показать, что (22) можно переписать в виде формулы (11), в которой

$$\lambda = \frac{p \cdot v}{v^2 + w^2}; \quad \mu = \frac{v \cdot (m - q) + w \cdot n}{v^2 + w^2}; \quad \eta^2 = \frac{(v^2 + w^2) \cdot p^2 + [v \cdot n - w \cdot (m - q)]^2}{(v^2 + w^2)^2}. \quad (28)$$

Криволинейный интеграл I_j будет удобнее вычислять по преобразованной формуле (13), в которой

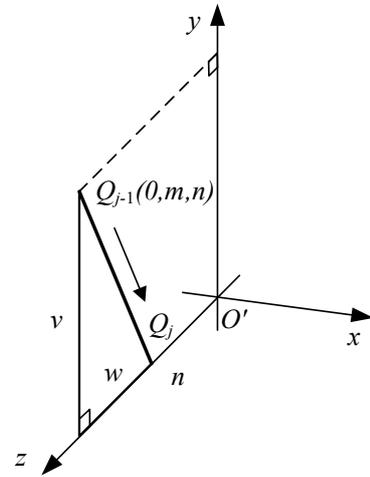


Рисунок 7. – Схема определения координат концов отрезка $\overline{Q_{j-1}Q_j}$ в случае параллельных элементарной площадки dF_1 и поверхности F_2

$$\phi = p \cdot v; \quad \chi = v^2 + w^2; \quad \psi = v \cdot (m - q) + w \cdot n; \quad \omega = \sqrt{(v^2 + w^2) \cdot p^2 + [v \cdot n - w \cdot (m - q)]^2}. \quad (29_{\text{н}})$$

В частности, для горизонтального $Q_{j-1}Q_j$ ($v = 0$) будем иметь:

$$\phi = 0 \Rightarrow I_j = 0, \quad (29_{\text{г}})$$

а для вертикального $Q_{j-1}Q_j$ ($w = 0$):

$$\phi = p; \quad \chi = v; \quad \psi = m - q; \quad \omega = \sqrt{p^2 + n^2}. \quad (29_{\text{в}})$$

Вычисление углового коэффициента облученности α_{2-1} на примере горения фронтона двускатной кровли, выполненной из горючих материалов.

Найдем аналитическое выражение углового коэффициента облученности α_{2-1} , для которого поверхность F_2 является треугольником $Q_0Q_1Q_2$ с горизонтальным основанием, например для случая, изображенного на рисунке 3а, когда поверхности F_2 и dF_1 образуют острый угол.

Пусть для определенности высота треугольника $Q_0Q_1Q_2$ равна h , а проекции сторон Q_0Q_1 и Q_2Q_0 на основания равны b и a соответственно (рис. 8). Поместим начало координат O' так, чтобы проекция вершины Q_0 на основание треугольника лежала на оси $O'z$. Тогда вершина треугольника Q_0 имеет координаты $Q_0(0, h, n / \cos \gamma)$. При этом

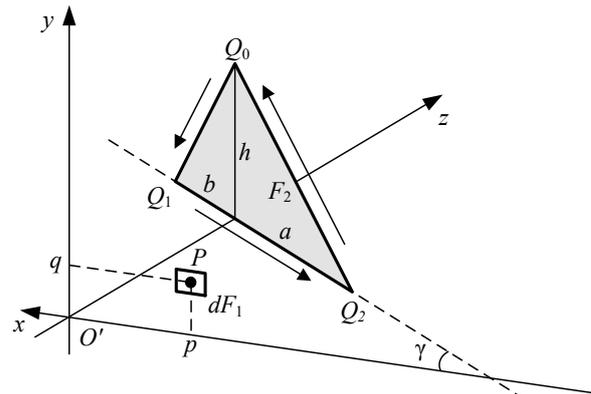


Рисунок 8. – Вид фронтона двускатной кровли (поверхности F_2) со стороны площадки dF_1

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_0 + \overrightarrow{Q_0Q_1} = Q_0 + \overrightarrow{(b \cos \gamma, -h, b \sin \gamma)}; \\ Q_2 &= Q_1 + \overrightarrow{Q_1Q_2} = Q_1 + \overrightarrow{(-(a+b) \cos \gamma, 0, -(a+b) \sin \gamma)}; \\ Q_0 &= Q_2 + \overrightarrow{Q_2Q_0} = Q_2 + \overrightarrow{(a \cos \gamma, h, a \sin \gamma)}. \end{aligned} \quad (30)$$

А значит, координаты $k_{j-1}, m_{j-1}, z_{j-1}$ точек Q_{j-1} и скалярные величины $u_{j-1,j}, v_{j-1,j}$ для отрезков $Q_{j-1}Q_j$ будут иметь следующие значения.

$$\begin{aligned} Q_0Q_1: & \quad k_0 = 0; & \quad m_0 = h; & \quad z_0 = n / \cos \gamma; & \quad u_{01} = b; & \quad v_{01} = -h. \\ Q_1Q_2: & \quad k_1 = b \cos \gamma; & \quad m_1 = 0; & \quad z_1 = n / \cos \gamma + b \sin \gamma; & \quad u_{12} = -(a+b); & \quad v_{12} = 0. \\ Q_2Q_0: & \quad k_2 = -a \cos \gamma; & \quad m_2 = 0; & \quad z_2 = n / \cos \gamma - a \sin \gamma; & \quad u_{20} = a; & \quad v_{20} = h. \end{aligned} \quad (31)$$

Откуда по формулам (19_г) для Q_1Q_2 и (19_н) для Q_0Q_1 и Q_2Q_0 получим

$$\begin{aligned} Q_0Q_1: & \quad \phi_1 = [b \cdot (h - q) \cos \gamma + h \cdot (-p)] \cos \gamma; \quad \chi_1 = (b^2 + h^2) \cos \gamma; \\ & \quad \psi_1 = b \cdot (-p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma) - h \cdot (h - q) \cos \gamma; \\ & \quad \omega_1 = \sqrt{(b^2 + h^2) \cdot (p \sin \gamma + n)^2 \cos^2 \gamma + [b \cdot (h - q) \cos \gamma + h \cdot (-p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma)]^2}; \\ Q_1Q_2: & \quad \phi_2 = -q \cos^2 \gamma; \quad \chi_2 = -(a+b) \cos \gamma; \\ & \quad \psi_2 = b \cos \gamma - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma; \quad \omega_2 = \sqrt{(p \sin \gamma + n)^2 + q^2} \cdot \cos \gamma; \\ Q_2Q_0: & \quad \phi_3 = [a \cdot (-q) \cos \gamma - h \cdot (-a \cos \gamma - p)] \cos \gamma; \quad \chi_3 = (a^2 + h^2) \cos \gamma; \\ & \quad \psi_3 = a \cdot (-a \cos \gamma - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma) + h \cdot (-q) \cos \gamma; \\ & \quad \omega_3 = \sqrt{(a^2 + h^2) \cdot (p \sin \gamma + n)^2 \cos^2 \gamma + [a \cdot (-q) \cos \gamma - h \cdot (-a \cos \gamma - p \cos^2 \gamma + n \sin \gamma)]^2}. \end{aligned} \quad (32)$$

Таким образом, угловой коэффициент облученности α_{2-1} между элементарной площадкой dF_1 и треугольной поверхностью $F_2 = \Delta Q_0 Q_1 Q_2$ может быть вычислен по формуле

$$\alpha_{2-1} = I_1 + I_2 + I_3 = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2\pi} \frac{\phi_j}{\omega_j} \left(\operatorname{arctg} \frac{\chi_j + \psi_j}{\omega_j} - \operatorname{arctg} \frac{\psi_j}{\omega_j} \right). \quad (33)$$

В частности, положив в (32)–(33) $\gamma = 0$, получим формулу вычисления этого углового коэффициента облученности для случая параллельных излучающей и принимающей поверхностей:

$$\begin{aligned} Q_0 Q_1: \quad & \phi_1 = b \cdot (h - q) - h \cdot p; \quad \chi_1 = b^2 + h^2; \quad \psi_1 = b \cdot (-p) - h \cdot (h - q); \\ & \omega_1 = \sqrt{(b^2 + h^2) \cdot n^2 + [b \cdot (h - q) + h \cdot (-p)]^2} = \sqrt{(b^2 + h^2)n^2 + [bh - bq - hp]^2}; \\ Q_1 Q_2: \quad & \phi_2 = -q; \quad \chi_2 = -(a + b); \quad \psi_2 = b - p; \quad \omega_2 = \sqrt{n^2 + q^2}; \\ Q_2 Q_0: \quad & \phi_3 = a \cdot (-q) - h \cdot (-a - p); \quad \chi_3 = a^2 + h^2; \quad \psi_3 = a \cdot (-a - p) + h \cdot (-q); \\ & \omega_3 = \sqrt{(a^2 + h^2) \cdot n^2 + [a \cdot (-q) - h \cdot (-a - p)]^2} = \sqrt{(a^2 + h^2) \cdot n^2 + [-aq + ha + hp]^2}. \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{2-1} &= \frac{(33), (34)}{2\pi} \frac{bh - bq - hp}{\omega_1} \left(\operatorname{arctg} \frac{b^2 - bp + hq}{\omega_1} - \operatorname{arctg} \frac{-bp - h^2 + hq}{\omega_1} \right) + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \frac{-q}{\sqrt{n^2 + q^2}} \left(\operatorname{arctg} \frac{-a - p}{\sqrt{n^2 + q^2}} - \operatorname{arctg} \frac{b - p}{\sqrt{n^2 + q^2}} \right) + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \frac{-aq + ha + hp}{\omega_3} \left(\operatorname{arctg} \frac{h^2 - ap - hq}{\omega_3} - \operatorname{arctg} \frac{-a^2 - ap - hq}{\omega_3} \right). \end{aligned} \quad (35)$$

Последние аналитические выражения с точностью до элементарных преобразований совпадают с ранее полученными результатами работы [3] для случая параллельных излучающей и принимающей поверхностей.

На основании вышеизложенного следует, что с использованием полученных формул можно вычислить угловой коэффициент облученности для плоской излучающей поверхности произвольной многоугольной формы, расположенной под углом $0 \leq \gamma < \pi$ относительно плоскости принимающей элементарной площадки. Такой подход позволяет учесть пространственную ориентацию поверхностей и их различную геометрическую конфигурацию.

Полученные выражения были апробированы на примерах, изложенных в [1, с. 317–341; 2, с. 179–194; 17, с. 97–99]. Приведенные для этих примеров решения идентичны результатам, полученным по формулам (24_н) и (24_г), что свидетельствует о корректности и согласованности предложенной модели в заданных условиях. Для дополнительной проверки адекватности модели проведен анализ частных случаев расчета углового коэффициента облученности. В частности, в работе [17, с. 97–99] представлена схема расположения излучающих и принимающих поверхностей, а также выполнен численный расчет углового коэффициента облученности согласно методике, изложенной в EN 1991-1-2⁴. При рассмотрении аналогичного случая с использованием формул (13) и (14_н) получены полностью совпадающие результаты, что подтверждает многофункциональность предложенных формул.

Заключение

В рамках выполненного исследования была разработана универсальная математическая модель для определения углового коэффициента облученности, учитывающая

⁴ Eurocode 1: Action on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire: EN 1991-1-2-2002. – Introduced 01.09.2002. – Brussels: European committee for standardization, 2002. – 59 p.

пространственное расположение излучающей и принимающей поверхностей. Полученные аналитические выражения позволяют производить расчеты для излучающих поверхностей произвольной многоугольной формы, расположенных под различными углами ($0 \leq \gamma < \pi$) относительно принимающей поверхности, что значительно расширяет возможности анализа радиационного теплообмена.

Результаты работы могут быть применены для проектирования противопожарных разрывов между зданиями с учетом их индивидуальных геометрических особенностей, а также для повышения точности оценки теплового воздействия на соседние сооружения. Это особенно важно в условиях плотной городской и сельской застройки, а также для объектов, выполненных из горючих материалов.

Геометрические формы излучающей поверхности 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. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
2. Пожарная профилактика в строительстве: учебник / Б.В. Грушевский [и др.]; под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М., 1985. – 454 с.
3. 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. 1, № 1. – С. 93–103. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. – EDN: DBRUSN.
4. 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.
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. Rossi, J.L. An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires / J.L. Rossi, A. Simeoni, B. Moretti, V. Leroy-Cancellieri // Fire Safety Journal – 2011. – Vol. 46. – P. 520–527. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.07.007.
9. Соболев, В.П. К вопросу о пространственном распределении интенсивности лучистого потока энергии от источника большой площади / В.П. Соболев, П.Н. Гоман, В.И. Янчук // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 116–124.
10. Makarov, A.N. Theory of radiative heat exchange in furnaces, fire boxes, combustion chambers is replenished by four new laws / A.N. Makarov // Science Discovery – 2014. – Vol. 2, No. 2. – P. 34–42. – DOI: 10.11648/j.sd.20140202.12.
11. Shokri, M. Radiation from Large Pool Fires / M. Shokri, C.L. Beyler // Journal of Fire Protection Engineering. – 1989. – Vol. 1 (4). – P. 141–149. – DOI: 10.1177/104239158900100404.
12. Mudan, K.S. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires / K.S. Mudan // Progress in Energy and Combustion Science. – 1984. – Vol. 10 (1). – P. 59–80. – DOI: 10.1016/0360-1285(84)90119-9.
13. Modak, A.T. Thermal radiation from pool fires / A.T. Modak // Combustion and Flame. – 1977. – Vol. 29. – P. 177–192. – DOI: 10.1016/0010-2180(77)90106-7.
14. 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.
15. Modest, M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest. – Oxford: Elsevier, 2013. – 897 p.
16. Спэрроу, Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс; перевод с английского С.З. Сориц, Л.М. Сорокопуда; под ред. А.Г. Блоха. – Энергия, 1971. – 283 с.
17. Sigmund, C. Eurocodes spreadsheets Structural Design, First edition / C. Sigmund. – SIGMUND, 2014. – 460 p.

Математическая модель определения углового коэффициента облученности для расчета плотности теплового потока, приходящего от излучателя плоской формы

Mathematical model for determining the angular irradiation coefficient for calculating the heat flux density coming from a plane-shaped emitter

Пастухов Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
ООО «ССПЭБ» (Союз специалистов промышленной и экологической безопасности), главный специалист по пожарной безопасности, гражданской обороне и чрезвычайным ситуациям
Адрес: Новинский бульвар, 31, 123242, г. Москва, Россия
Email: plamennyj98@gmail.com
SPIN-код: 3018-2219

Sergey M. Pastukhov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Limited Liability Company «SSPEB» (Union of Industrial and Environmental Safety Specialists), Chief Specialist in Fire Safety, Civil Defense, and Emergency Situations
Address: Novinsky boulevard, 31, 123242, Moscow, Russia
Email: plamennyj98@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1437-1913

Платонов Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», отдел научной и инновационной деятельности, ведущий научный сотрудник
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: alexpltn@mail.ru
SPIN-код: 9291-2147

Aleksandr S. Platonov

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», Department of Scientific and Innovation Activity, Leading Researcher
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: alexpltn@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5463-6029

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

Дробыш Антон Сергеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», отдел научной и инновационной деятельности, начальник отдела
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: aantox@mail.ru
SPIN-код: 3169-0097

Anton S. Drobysch

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: aantox@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9528-3108

**MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE ANGULAR IRRADIATION
COEFFICIENT FOR CALCULATING THE HEAT FLUX DENSITY
COMING FROM A PLANE-SHAPED EMITTER**

Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysch A.S.

Purpose. Develop a universal mathematical model for evaluating the angular irradiation coefficient, taking into account the spatial arrangement of the emitting and receiving surfaces, where the former is represented by an arbitrary polygon.

Methods. The model development was based on existing theoretical approaches in the field of radiative heat transfer, the geometry of possible mutual surface arrangements, and the results of experimental studies. Numerical methods were also employed to verify the adequacy of the analytical expressions.

Findings. Universal analytical expressions have been derived for determining the angular irradiation coefficient for an emitting surface of an arbitrary polygonal shape, positioned at an arbitrary angle to the receiving surface. The developed expressions account for the individual geometric characteristics of objects and the mutual arrangement of the emitting and receiving surfaces, enhancing the accuracy of thermal impact calculations on adjacent buildings and structures.

Application field of research. Determination of fire safety spacing between buildings with gable roofs made of combustible materials, considering their spatial arrangement and geometric structural features. The model can be used for the design and fire safety assessment of buildings and structures in densely built urban and rural areas.

Keywords: fire safety spacing, geometric parameters of the flame, angular irradiation coefficient, combustible roofing materials, thermal radiation.

(The date of submitting: January 13, 2025)

REFERENCES

1. Roytman M.Y. *Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve* [Fire safety regulation in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 590 p. (rus)
2. 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, 1985. 454 p. (rus)
3. Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysch A.S. Matematicheskaya model' opredeleniya uglovogo koeffitsiyenta obluchennosti pri raschete protivopozharnykh razryvov mezhdu zdaniyami s dvuskatnymi krovlyami, 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. 1, No. 1. Pp. 93–103. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. EDN: DBRUSN.
4. 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-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 2 (20). Pp. 23–31. (rus). EDN: SWENLV.
5. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester: University of Edinburgh, 1999. 470 p.
6. Karlsson B., Quintiere J. G. *Enclosure Fire Dynamics*. 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*. Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1999. 125 p.
8. Rossi J.L., Simeoni A., Moretti B., Leroy-Cancellieri V. An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires. *Fire Safety Journal*, 2011. Vol. 46. Pp. 520–527. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.07.007.
9. Sobol' V.R., Goman P.N., Yanut' V.I. K voprosu o prostranstvennom raspredelenii intensivnosti luchistogo potoka energii ot istochnika bol'shoy ploshchadi [Space distribution of intensity of radiant flux from the large surface source]. *Emergency Situations: Education and Science*, 2011. Vol. 6, No 2. Pp. 116-124.

10. Makarov A.N. Theory of radiative heat exchange in furnaces, fire boxes, combustion chambers is replenished by four new laws. *Science Discovery*, 2014. Vol. 2, No. 2. Pp. 34–42. DOI: 10.11648/j.sd.20140202.12.
11. Shokri M., Beyler C.L., Radiation from Large Pool Fires. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1989. Vol. 1 (4). Pp. 141–149. DOI: 10.1177/104239158900100404.
12. Mudan K.S., Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1984. Vol. 10(1). Pp. 59–80. DOI: 10.1016/0360-1285(84)90119-9.
13. Modak A.T., Thermal radiation from pool fires. *Combustion and Flame*, 1977. Vol. 29. Pp. 177–192. DOI: 10.1016/0010-2180(77)90106-7.
14. Pastukhov S.M., Teteryukov A.V. Metodika provedeniya eksperimental'nykh issledovaniy po opredele-niyu geometricheskikh parametrov plameni pri gorenii krovel'nykh materialov [The method of experi-mental researches to determine the geometric parameters of the flame during combustion of roofing ma-terials]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 176–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176. EDN: XPAXID.
15. Modest M.F. *Radiative Heat Transfer*. Oxford: Elsevier, 2013. 897 p.
16. Sperrou E.M., Sess R.D. *Teploobmen izlucheniym* [Radiative Heat Transfer]. Ed. by A.G. Blokh. Moscow: Energiya, 1971. 283 p. (rus)
17. Sigmund C. *Eurocodes spreadsheets Structural Design. First edition*. Rotterdam, Netherlands: SIGMUND, 2014. 460 p.

Copyright © 2025 Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S.

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

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТИПОВЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ

Нехань Д.С., Полевода И.И., Зайнудинова Н.В., Ивлев Ю.П., Ботян С.С., Лишай И.Л.

Цель. Установить критерии выбора типовых представителей железобетонных изделий для испытаний по определению предела огнестойкости при проведении процедур по оценке соответствия техническим требованиям.

Методы. Обобщение подходов по распространению результатов испытаний на огнестойкость строительных конструкций и теоретических методов оценки их огнестойкости. Анализ влияния количественных и качественных показателей железобетонных изделий на их теоретическую огнестойкость, а также результаты огневых испытаний, в том числе их распространение.

Результаты. Разработан алгоритм и определены критерии выбора типовых представителей железобетонных изделий для проведения сертификационных испытаний на огнестойкость, основанные на комплексном анализе упрощенных методов и существующих табличных данных по оценке огнестойкости. Их применение позволяет обеспечить пожарную безопасность зданий за счет выбора для проведения сертификационных испытаний на огнестойкость железобетонного изделия, структурные и конструктивные особенности которого свидетельствуют о том, что оно потенциально обладает наиболее низкой огнестойкостью из всех изделий серии.

Область применения исследований. Полученные результаты могут использоваться при конструировании железобетонных изделий, а также при проектировании зданий и сооружений. Органы по сертификации могут использовать полученные результаты в рамках оценки (подтверждения) соответствия серии железобетонных изделий техническим требованиям при выборе типовых представителей железобетонных изделий для испытаний. Результаты, полученные в настоящей работе, включены в Положение по выбору типовых представителей железобетонных изделий для проведения испытаний по определению прочности, жесткости, трещиностойкости, предела огнестойкости при проведении процедур по оценке соответствия.

Ключевые слова: железобетонные изделия, огнестойкость, предел огнестойкости, огневые испытания, типовой представитель, критерии выбора, оценка соответствия, технические требования, толщина защитного слоя бетона.

(Поступила в редакцию 14 января 2025 г.)

Введение

В Республике Беларусь ежегодно происходит около шести тысяч пожаров, приводящих к социальному и экономическому ущербу. В таких условиях задача обеспечения огнестойкости зданий при пожаре требует особого внимания. Огнестойкость строительных конструкций является показателем их качества при возникновении пожара, а ее обеспечение равно выполнению одного из существенных требований безопасности зданий и сооружений¹. В связи с этим огнестойкость изделий, в том числе железобетонных, – один из ключевых факторов, определяющих их область применения.

В настоящее время для серийно выпускаемых изделий проводится оценка соответствия их предъявляемым техническим требованиям. Испытания, проводимые испытательной лабораторией (центром), являются неотъемлемой процедурой в рамках подтверждения соответствия, в результате которой определяются один или несколько количественных и (или) качественных показателей (характеристик) объекта оценки соответствия (образца

¹ Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ. – Введ. 01.08.2010. – Минск: Госстандарт, 2015. – 28 с.

продукции)². Такая процедура является основным способом подтверждения качества сертифицируемой продукции в части соблюдения существенных требований, по результатам которой делается общий вывод о серии (партии) продукции. Выбор необходимого числа изделий для испытаний – одна из важнейших составляющих при оценке соответствия серийной продукции техническим требованиям. Непрактичным является проведение испытаний большого массива однотипных железобетонных изделий, образующих серию, но при этом обладающих вариативностью формы, размеров и конструктива.

Параметры железобетонных изделий, влияющие на их огнестойкость, достаточно обширны^{3, 4}. Существующая степень разрешенных вариаций при прямом распространении результатов огневых испытаний строительных изделий достаточно консервативна и основывается на минимальном уровне общего достигнутого соглашения между изделиями⁵. При этом результаты испытаний изделий серии, выбираемых техническим экспертом по сертификации, должны с высоким уровнем достоверности гарантировать для всей серийной продукции выполнение своих функций при пожаре в течение предписываемого промежутка времени. Указанные факторы усложняют процедуру поиска оптимального для испытаний изделия серии с точки зрения выполнения комплекса экономических и социальных, экономических и научно-технических мер системы пожарной безопасности. Поэтому разработка алгоритма и определение критериев, позволяющих выбрать из перечня железобетонных изделий типового представителя для проведения испытаний по определению предела огнестойкости при проведении процедур по оценке соответствия техническим требованиям (далее – типовой представитель), является актуальной задачей. Решение такой задачи позволит обеспечить соответствие серийной продукции существенным требованиям безопасности при строительстве зданий и сооружений.

Основная часть

Огнестойкость определяется как способность зданий (пожарных отсеков), сооружений и строительных конструкций сохранять свои функции при пожаре⁶. Огнестойкость зданий (пожарных отсеков) и сооружений характеризуется степенью огнестойкости, а строительных конструкций – пределом огнестойкости, под которым принято понимать промежуток времени от начала огневого воздействия в условиях стандартных испытаний до наступления одного из нормируемых для данной конструкции предельных состояний.

В настоящее время вывод об обеспечении огнестойкости делается на основании сопоставления требуемой (предписывающей) $CO_{тр}$ и фактической степеней огнестойкости здания (пожарного отсека) $CO_{ф}$. Требуемая (предписывающая) степень огнестойкости определяется по приложениям Б–Е СН 2.02.05⁷ в зависимости от класса функциональной пожарной опасности зданий, их этажности (высоты), площади этажа, для общественных зданий – дополнительно вместимости, для производственных, складских и сельскохозяйственных зданий – дополнительно категории по взрывопожарной и пожарной опасности. Фактическая

² Об оценке соответствия техническим требованиям и аккредитации органов по оценке соответствия: Закон Респ. Беларусь, 24 окт. 2016 г., № 437-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11600437> (дата обращения: 04.01.2025).

³ Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Введ. 01.01.2009 (с отменой на территории Респ. Беларусь П1-02 к СНБ 2.02.01-98). – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 135 с.

⁴ Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250). – Введ. 01.01.2010. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 87 с.

⁵ Испытания на огнестойкость. Часть 1. Общие требования: СТБ EN 1363-1-2009. – Взамен СТБ EN 13501-3-2009; введ. 01.01.2010. – Минск: БелГИСС, 2010. – 92 с.

⁶ Система стандартов пожарной безопасности. Пассивная противопожарная защита. Термины и определения: СТБ 11.0.03-95. – Введ. 01.10.1995. – Минск: Госстандарт, 2011. – 25 с.

⁷ Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020. – Введ. 04.04.2021 (взамен СН 2.02.01-2019, с отменой ТКП 45-2.02-315-2018 (33020)). – Минск: Минстройархитектуры, 2023. – 74 с.

степень огнестойкости здания (пожарного отсека) определяется огнестойкостью строительных конструкций, из которых оно выполнено [1].

Для оценки фактических значений пределов огнестойкости $ПО_{\phi}$ используются не только экспериментальные, в отличие от определения прочности бетонных образцов и арматурных стержней, но также теоретические подходы. В соответствии с п. 5.2.2 СН 2.02.05⁸ огневые испытания определены как первообразная составляющая для установления предела огнестойкости. При этом в случае невозможности создания реальных условий работы строительных конструкций при проведении огневых испытаний предел огнестойкости конструкций определяют расчетом, содержащимся в технических нормативных правовых актах (далее – ТНПА). Собственный (фактический) предел огнестойкости железобетонной конструкции (изделия) зависит от характеристик бетона и арматуры, условий ее применения, конструктива, технологии изготовления и других факторов [1]. Следует отметить, что в действующих сериях (рабочих чертежах), где железобетонные изделия отличаются между собой по целому ряду признаков, определено единственное значение предела огнестойкости, которое, как правило, является заявленным значением при проведении испытаний. При этом не устанавливается, для какого конкретного изделия был определен указанный показатель.

Требуемые для заданной строительной конструкции пределы огнестойкости $ПО_{тр}$ устанавливаются на основании требуемой (предписывающей) степени огнестойкости здания (пожарного отсека) по таблице 1 СН 2.02.05. При этом для случаев использования изделий плит перекрытия в качестве противопожарных 1-го типа предписывающий предел огнестойкости REI150. Для плит перекрытия, отделяющих подземные этажи от наземной части в высотных зданиях, предписанный СН 3.02.08⁹ предел огнестойкости REI120. В ряде случаев для колонн, балок (ригелей) и других изделий, используемых в качестве несущих конструкций здания, предписывающий предел огнестойкости должен быть повышен¹⁰ до R150. Отдельно следует отметить предписанные СН 3.02.08 пределы огнестойкости для несущих, ограждающих конструкций, в том числе конструкций противопожарных преград, и конструкций инженерных коммуникаций в высотных зданиях. Данные значения существенно превышают показатели, приведенные в таблице 1 СН 2.02.05, по тексту СН 2.02.05, СН 2.02.07¹¹, СН 4.02.03¹² и других ТНПА.

Для выполнения условия безопасности по огнестойкости фактическая (собственная) огнестойкость здания (пожарного отсека) и строительных конструкций должны быть не ниже предписанных ТНПА, т.е. $CO_{\phi} \geq CO_{тр}$, $ПО_{\phi} \geq ПО_{тр}$.

Железобетонные изделия занимают особое место в формировании среды обитания человечества [2]. Применение их в качестве строительных конструкций определяется государственными и межгосударственными стандартами, устанавливающими для них перечень различных требований [3]. К железобетонным изделиям, для которых требования государственных (межгосударственных) стандартов (действующих на территории Республики Беларусь) определяют необходимость установления предела огнестойкости, относятся: панели стеновые железобетонные (СТБ 1185-99); плиты перекрытий железобетонные многопустотные (в том числе безопалубочного формования), плиты перекрытий железобетонные сплошные, плиты перекрытий железобетонные ребристые (СТБ 1383-2003); плиты балконов и лоджий

⁸ Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020. – Введ. 04.04.2021 (взамен СН 2.02.01-2019, с отменой ТКП 45-2.02-315-2018 (33020)). – Минск: Минстройархитектуры, 2023. – 74 с.

⁹ Высотные здания: СН 3.02.08-2020. – Введ. 24.03.2021 (с отменой ТКП 45-2.02-108-2008 (02250)). – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 69 с.

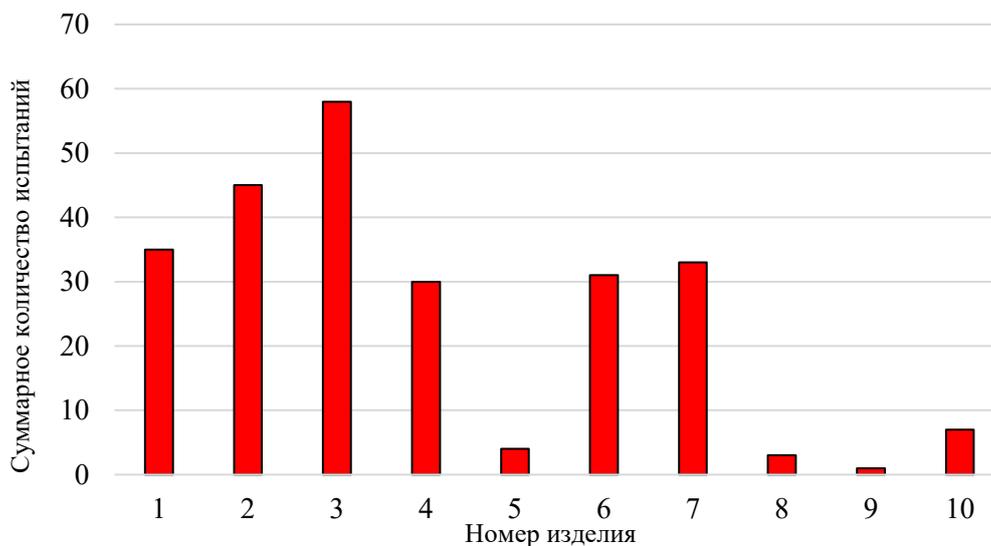
¹⁰ Пределы огнестойкости конструкций, на которые опирается противопожарная преграда, и узлов сопряжения между ними по признаку R должны быть не менее требуемого предела огнестойкости противопожарной преграды.

¹¹ Противодымная защита зданий и сооружений при пожаре. Системы вентиляции: СН 2.02.07-2020. – Введ. 10.05.2021 (с отменой ТКП 45-4.02-273-2012 (02250)). – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 20 с.

¹² Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03-2019. – Введ. 08.09.2020 (с отменой СНБ 4.02.01-03). – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 73 с.

железобетонные (СТБ 1237-2000); прогоны железобетонные, балки стропильные и подстропильные железобетонные, ригели железобетонные (СТБ 1186-99); колонны железобетонные (СТБ 1178-99); фермы железобетонные (СТБ 2075-2010); марши и площадки лестниц железобетонные (СТБ 1169-99); блоки вентиляционные железобетонные (СТБ 2172-2011); блоки шахт лифтов, панели стеновые шахт лифтов, плиты перекрытия над шахтами лифтов (СТБ 1513-2004); изделия железобетонные сборные для многоэтажных зданий с безбалочными перекрытиями (ГОСТ 27108-86); панели бетонные и железобетонные из легких бетонов (ГОСТ 32488-2013); складки сборные железобетонные предварительно напряженные (СТБ 1514-2004); рамы железобетонные для однопролетных сельскохозяйственных зданий (СТБ 1623-2006); блоки железобетонные объемные для зданий (СТБ 2215-2011).

Статистический анализ огневых испытаний железобетонных изделий в Республике Беларусь. Проведенный статистический анализ количественных данных НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси по испытаниям железобетонных изделий на огнестойкость за период 2004–2024 гг. (рис. 1) показал, что более 55 % от всех испытаний железобетонных изделий приходится на плиты перекрытия, в том числе сплошные (включая плиты балконов и лоджий), ребристые и многопустотные. С использованием подходов, аналогичных подходам к проверке плит перекрытия, испытываются лестничные марши и площадки: общее количество составляет более 25 % от всех испытанных железобетонных изделий. Особое место занимают панели стеновые железобетонные, для которых количество испытаний на огнестойкость в разрезе всех железобетонных изделий составляет около 15 %.



1 – панели стеновые железобетонные (СТБ 1185-99); 2 – плиты перекрытий железобетонные многопустотные (в том числе безопалубочного формования) (СТБ 1383-2003); 3 – плиты перекрытий железобетонные сплошные (СТБ 1383-2003); 4 – плиты перекрытий железобетонные ребристые (СТБ 1383-2003); 5 – плиты балконов и лоджий железобетонные (СТБ 1237-2000); 6 – марши лестниц железобетонные (СТБ 1169-99); 7 – площадки лестниц железобетонные (СТБ 1169-99); 8 – блоки вентиляционные железобетонные (2172-2011); 9 – панели стеновые шахт лифтов (СТБ 1513-2004); 10 – плиты перекрытия над шахтами лифтов (СТБ 1513-2004)

Рисунок 1. – Распределение испытаний на огнестойкость, проведенных в НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси за период 2004–2024 гг., по видам железобетонных изделий

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время не существует единых критериев (правил) выбора представителей серии для испытаний. Это касается не только испытаний на огнестойкость. Типовые представители для сертификационных испытаний продукции выбираются в случае большого количества однотипной продукции, которая соответствует одному или нескольким ТНПА и изготавливается по единой технологии. Образцы для сертификационных испытаний отбираются случайным образом из разных мест подконтрольной партии, назначенной в качестве типового представителя. В ряде случаев

в качестве типового представителя выступают изделия серии с минимальным и (или) максимальным значением показателя качества^{13, 14}.

С увеличением количества варьируемых параметров в серии любой продукции процедура выбора типового представителя усложняется ввиду увеличения факторов, влияющих на конечный результат испытания. При этом потенциальное число типовых представителей, если не установлена соответствующая корреляция между параметрами и их влиянием на конечный результат, увеличивается в $2^{n_{\phi}}$ раз, где n_{ϕ} – число варьируемых параметров (факторов), влияющих на конечный результат.

Рассматривая сертификационные испытания железобетонных изделий как форму подтверждения предела огнестойкости железобетонных изделий, приняв во внимание хотя бы два варьируемых параметра (например, толщина изделия и расстояние до оси арматуры) при неизменных остальных показателях (класс бетона, класс арматуры, уровень нагрузки при пожаре и т.д.), испытание четырех образцов с минимальными и максимальными значениями переменных параметров позволило бы получить четыре различных значения предела огнестойкости и присвоить изделиям в серии в зависимости от их параметров конкретное значение предела огнестойкости. При наличии трех переменных параметров количество испытываемых образцов выросло бы до восьми. Согласно требованиям ГОСТ 30247.0¹⁵, ГОСТ 30247.1¹⁶ число образцов одного конструктива для испытаний составляет не менее двух, поэтому число испытаний увеличивается до 16, что существенно удорожает сертификацию продукции. Учитывая отсутствие необходимости в распространении результатов испытаний типа «от... до...» (в серии и сертификате соответствия указывается единственное значение предела огнестойкости), достаточным является поиск изделия, которое однозначно обладает наименьшей огнестойкостью. Если такая однозначность не достигается выбором одного изделия, то число изделий для испытаний увеличивается. Исходя из этого определено понятие типового представителя для сертификационных испытаний на огнестойкость – изделие, структурные и конструктивные особенности которого свидетельствуют о том, что оно потенциально обладает наиболее низкой огнестойкостью из всех изделий серии. При этом качество исходного сырья (материалов), соблюдение технологии производства железобетонных изделий в априори считается отвечающим установленным требованиям ТНПА и технической документации. В случае когда эти характеристики не подтверждены, проведение испытаний на огнестойкость считается нецелесообразным.

Процесс выбора типовых представителей должен основываться на учете различных факторов, которые могут повлиять на поведение изделий серии при пожаре, а также на оптимизации количества испытаний. Для оптимизации количества типовых представителей внешние факторы (неконструктивные и структурные особенности самого изделия) для таких испытаний должны быть исключены: одинаковый уровень нагрузки при пожаре, тепловое воздействие во времени, условия закрепления на экспериментальной установке, применяемое испытательное оборудование, идентификация признаков наступления предельных состояний и др.

Классификация железобетонных изделий. Для возможности определения порядка выбора типового представителя железобетонных изделий для сертификационных испытаний

¹³ Порядок обязательного подтверждения соответствия продукции требованиям технического регламента Таможенного союза «О безопасности низковольтного оборудования»: ГОСТ Р 56017-2014. – Введ. 01.07.2015. – М.: Стандартинформ, 2020. – 62 с.

¹⁴ Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током, бытового и аналогичного назначения со встроенной защитой от сверхтоков. Часть 1. Общие требования и методы испытаний: ГОСТ Р 51327.1-2010. – Введ. 01.01.2012. – М.: Стандартинформ, 2011. – 118 с.

¹⁵ 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. – 11 с.

¹⁶ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Взамен СТ СЭВ 1000-78, СТ СЭВ 5062-85; введ. 01.01.1996. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 11 с.

на огнестойкость на этапе идентификации изделий серии их следует классифицировать. Исходя из особенностей поведения железобетонных конструкций (изделий) при пожаре, установлена классификация железобетонных изделий, которая определяет для них исходный перечень параметров (показателей), необходимых для установления типового представителя.

В зависимости от выполняемых функций железобетонные конструкции (изделия) подразделяются на несущие стержневые, несущие ограждающие, ненесущие ограждающие, системы несущих стержневых элементов, системы несущих ограждающих элементов. В зависимости от пространственного положения железобетонные конструкции (изделия) подразделяются на горизонтальные и вертикальные. В зависимости от схемы испытаний (работы в составе здания) железобетонные изделия подразделяются на консоли, с защемлением по двум и более концам, свободно опертые и работающие в двух направлениях (опирающиеся по четырем или трем сторонам), свободно опертые и работающие в одном направлении (опирающиеся по двум сторонам). В зависимости от нагреваемого периметра (количества нагреваемых сторон) железобетонные конструкции (изделия) могут подвергаться огневому воздействию с одной, двух параллельных, двух перпендикулярных, трех или четырех сторон, а также по всему периметру и по части периметра.

При наличии изделий в серии, не попадающих в классификацию, выбор типового представителя осуществляется техническим экспертом по сертификации на основании общих параметров, с учетом особенностей указанных изделий. Рекомендуются в данном случае провести расчет огнестойкости по методам, содержащимся в ТНПА.

Параметры железобетонных изделий, необходимые для выбора типового представителя по определению предела огнестойкости (далее – параметры изделий). Для рассмотренного перечня железобетонных изделий, требования государственных (межгосударственных) стандартов (действующих на территории Республики Беларусь) на которые определяют необходимость установления предела огнестойкости, можно выделить общие и частные параметры (показатели). Общие параметры характерны для всех изделий, к ним относятся:

- геометрические параметры поперечного сечения (ширина¹⁷ b , высота h , толщина t , диаметр D);
- класс бетона (характеристическая прочность бетона на осевое сжатие);
- критерий хрупкого взрывообразного разрушения (далее – ХР) при пожаре $F_{ХР}$;
- приведенный коэффициент температуропроводности бетона a_{red} .

К частным параметрам (показателям) изделий, характерным для определенных видов изделий, определяемых их классификацией, относятся:

- расстояние от нагреваемой поверхности до оси арматуры¹⁸ c (толщина защитного слоя бетона¹⁹ a и диаметр рабочей арматуры d_s) – для несущих элементов;
- класс арматуры (характеристическая прочность арматуры) – для несущих элементов;
- гибкость λ (расчетная длина (высота) l_0) – для вертикальных несущих элементов;
- длина пролета l_n – для горизонтальных несущих элементов;
- условия опирания (закрепления концов изделия) – для несущих элементов;
- уровень нагрузки при пожаре η_f (коэффициент использования несущей способности при пожаре η) (по ТКП EN 1992-1-2 и ТКП 45-2.02-110) – для несущих элементов;
- уровень нагрузки n при нормальной температуре (по ТКП EN 1992-1-2) – для вертикальных несущих стержневых элементов;
- коэффициент армирования ω (по ТКП EN 1992-1-2) – для вертикальных несущих стержневых элементов;

¹⁷ В качестве ширины ребер в ребристых плитах принимается ширина на уровне расположения растянутой арматуры.

¹⁸ В качестве расстояния до оси арматуры принимается расстояние от нагреваемой поверхности до оси рабочей арматуры.

¹⁹ В качестве толщины защитного слоя бетона принимается расстояние по нормали от нагреваемой бетонной поверхности до ближайшей к ней цилиндрической образующей арматурного стержня.

– эксцентриситет продольной силы e относительно центра поперечного сечения – для вертикальных несущих элементов;
 – отношение объема бетона к геометрическому объему изделия V_c/V – для пустотелых изделий;
 – расстояние от нагреваемой поверхности до пустот – для пустотелых изделий;
 – расстояния от боковой(-ых) нагреваемой(-ых) поверхности(-ях) до оси арматуры c_{ω} – для горизонтальных несущих стержневых элементов, подвергаемых огневому воздействию с двух перпендикулярных и более сторон;
 – жесткость элемента – для заземленных несущих элементов;
 – длина заанкеренной арматуры (включая длину выпуска за торцевую часть изделия) – для горизонтальных пустотелых несущих преднапряженных элементов;
 – степень предварительного напряжения – для несущих элементов с предварительно напряженной арматурой.

Перечень частных параметров по решению технического эксперта по сертификации может быть расширен с учетом заранее известной специфики работы рассматриваемых изделий (при учете работы на кручение, местном сжатии, местном отрыве, продавливании и др.).

Расстояние до оси арматуры c , толщина защитного слоя бетона a и диаметр рабочей арматуры d_s связаны следующей зависимостью:

$$c = a + 0,5d_s. \quad (1)$$

Длина пролета горизонтальных несущих элементов определяется по формуле²⁰:

$$l_{\text{н}} = l_{\text{и}} - h_{\text{оп}}, \quad (2)$$

где $l_{\text{и}}$ – длина изделия;

$h_{\text{оп}}$ – глубина опирания изделия (рекомендуется принимать минимальное значение по серии).

Приведенный коэффициент температуропроводности бетона $a_{\text{ред}}$, м²/ч, определяется по формуле [4]:

$$a_{\text{ред}} = \frac{3,6\lambda_c(1 + 0,01W_c)}{(c_{\text{р.с}} + 0,05W_c)\rho_c}, \quad (3)$$

где λ_c – эффективный коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·К);

$c_{\text{р.с}}$ – удельная изобарная теплоемкость бетона, кДж/(кг·К);

ρ_c – средняя плотность бетона, кг/м³;

W_c – весовая влажность бетона, %.

Критерий ХР при пожаре $F_{\text{ХР}}$ определяется в соответствии с приложением К ТКП 45-2.02-110. Для бетонов нормального веса с силикатным заполнителем при известных условиях эксплуатации (классах эксплуатации) $F_{\text{ХР}}$ допускается определять по формуле:

$$F = O \cdot \frac{f_{ck}^{0,3}}{\rho_c^{0,12}}, \quad (4)$$

где f_{ck} – характеристическая прочность бетона на осевое сжатие, МПа;

O – размерный параметр, кг^{0,12}·м^{-0,36}·МПа^{-0,3}. Допускается принимать равным 11 – для класса эксплуатации (по СТБ EN 206²¹) Х0; 17 – для ХС1; 30 – для ХС2; 25 – для ХС3; 35 – для ХС4.

Получаемое по формуле (4) значение $F_{\text{ХР}}$ применимо только для проведения оценочных действий в рамках выбора типового представителя.

²⁰ Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements: ISO 834-1:1999 (E). – Implemented 15.09.2000. – Geneva: ISO, 2000.

²¹ Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие : СТБ EN 206-2016. – Введ. 01.07.2017. – Минск: Госстандарт, 2017. – 105 с.

Для серий, в которых не указываются уровень нагрузки при пожаре η_{fi} или контрольная нагрузка при испытании на огнестойкость $E_{d,fi}$, эти величины определяются в соответствии с п. 2.4.2 (3) ТКП EN 1992-1-2 с учетом приложения А СН 2.01.01²², положений СН 2.01.02²³ и СН 2.01.03²⁴. Для испытаний на огнестойкость допускается принимать $\eta_{fi} = 0,7$. Значение $E_{d,fi}$ (без учета собственного веса) определяется по формуле:

$$E_{d,fi} = \frac{E_{d,c}}{C} \cdot \eta_{fi}, \quad (5)$$

где $E_{d,c}$ – контрольная разрушающая нагрузка (нагрузка по прочности) (без учета собственного веса);

C – коэффициент безопасности по ГОСТ 8829²⁵.

Поведение железобетонных конструкций при пожаре во многом также определяется видом классом бетона, составом бетонной смеси, классом арматуры, ее критической температурой и положением. Поэтому после определения фактических общих и частных параметров (показателей) железобетонных изделий с целью возможности сравнения параметров (показателей) изделий между собой их необходимо привести к базовым. Базовыми могут считаться параметры полнотелого изделия с силикатным (гранитным) заполнителем, выполненного из бетона и арматуры класса не выше $C^{50}/_{60}$ (B60) и S500 (A500, A-III) соответственно.

Порядок приведения параметров железобетонных изделий к базовым показателям. Приведение параметров железобетонных изделий к базовым показателям производится в случае, если в серии применяются бетоны и (или) арматура различных классов и (или) различный вид крупного заполнителя.

При применении в изделиях, подвергаемых огневому воздействию с одной стороны, бетонов класса $C^{55}/_{67}$ и выше приведению к базовому показателю подлежит расстояние от нагреваемой поверхности до оси арматуры по формуле:

$$c_{пр} = c / k_c, \quad (6)$$

где k_c – коэффициент приведения, учитывающий класс бетона, равный 1,1, – для бетонов классов $C^{55}/_{67}$ – $C^{60}/_{75}$; 1,3 – для бетонов классов $C^{70}/_{85}$ – $C^{80}/_{95}$.

Для остальных изделий, выполненных из бетонов классов $C^{55}/_{67}$ и выше, приведению к базовому показателю подлежит расстояние от нагреваемой поверхности до оси арматуры по формуле (6), в которой принимается $k_c = 1,2$ – для бетонов классов $C^{55}/_{67}$ – $C^{60}/_{75}$ и $k_c = 1,6$ – для бетонов классов $C^{70}/_{85}$ – $C^{80}/_{95}$.

Для горизонтальных несущих элементов с предварительно напряженной арматурой в растянутой зоне классов выше S500 (A500, A-III) приведению к базовому показателю подлежит расстояние от нагреваемой поверхности до оси арматуры по формуле:

$$c_{пр} = c - k_s, \quad (7)$$

где k_s – коэффициент приведения, учитывающий класс арматуры (критическую температуру и предварительное натяжение), мм, равный 10 мм – для арматуры классов S800–S1200

²² Основы проектирования строительных конструкций: СН 2.01.01-2022. – Введ. 23.11.2022 (взамен СН 2.01.01-2019). – Минск: Минстройархитектуры, 2022. – 65 с.

²³ Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий: СН 2.01.02-2019. – Введ. 08.09.2020 (взамен ТКП EN 1991-1-1-2016 (33020)). – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 39 с.

²⁴ Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Введ. 01.01.2010 (с отменой ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250)). – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

²⁵ Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости: ГОСТ 8829-2018. – Введ. 01.01.2010. – М.: Стандартинформ, 2009. – 30 с.

(A600–A1000, A-IV–A-VI) и 15 мм – для проволочной и канатной арматуры классов S1400 (B500, Bp1200, Bp1300, Bp1400, Bp1500, K1400, K1500) и выше.

Для случаев, когда все изделия серии имеют арматуру одинакового класса, расстояние до оси арматуры допускается к базовому не приводить, а оперировать фактическим значением.

В случае расположения рабочей арматуры на разных расстояниях от нагреваемой поверхности, а также при использовании в качестве рабочей арматуры разных классов фактическое значение расстояния до оси арматуры, подставляемое в формулы (6) и (7), определяется следующим образом:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n A_{si} f_{yki} c_i}{\sum_{i=1}^n A_{si} f_{yki}}, \quad (8)$$

где A_{si} – площадь поперечного сечения арматурного стержня;

f_{yki} – характеристическая прочность i -го арматурного стержня;

c_i – расстояние от ближайшей из нагреваемых (нижней или боковой) бетонной поверхности конструкции до оси i -го арматурного стержня.

Для изделий с карбонатным заполнителем приведению к базовому показателю подлежат ширина b и высота h поперечного сечения (толщина изделия t) по формуле:

$$b_{np} = b \cdot k_3, \quad (9_1)$$

$$h_{np} = h \cdot k_3, \quad (9_2)$$

$$t_{np} = t \cdot k_3, \quad (9_3)$$

где $k_3 = 1,11$ – коэффициент приведения, учитывающий вид крупного заполнителя.

Для пустотелых изделий, например плит перекрытия многопустотных, приведению к базовому показателю подлежит толщина изделия по формуле:

$$t_{np} = t \sqrt{V_c / V}, \quad (10)$$

где $V_c, V = L \cdot b \cdot t$ – объем бетона и геометрический объем изделия;

L, b, t – фактические длина, ширина и толщина изделия соответственно.

Выделение основных и дополнительных параметров железобетонных изделий при выборе типового представителя. Учитывая достаточно обширный перечень параметров железобетонных конструкций, оказывающих влияние на их предел огнестойкости, использование схемы, при которой не учитывается важность влияния отдельных параметров на огнестойкость, может привести к существенной неопределенности в части корректности выбора типового представителя. В зависимости от степени детализации при выборе типового представителя, с учетом оптимизации количества изделий, подвергаемых испытаниям на огнестойкость, параметры (показатели) изделий следует разграничить на основные (ключевые) и дополнительные (используемые при прочих равных основных параметрах). До тех пор, пока не установлены значения взвешивающих коэффициентов для всех входных показателей (параметров), оказывающих влияние на огнестойкость, предлагается в качестве основных использовать показатели (параметры), определяющие огнестойкость железобетонных изделий во всех расчетных подходах, в том числе табличных данных, и учитываемые при распространении результатов огневых испытаний.

На основании проведенного анализа факторов (параметров), определяющих распространение результатов испытаний железобетонных конструкций на огнестойкость, согласно международным стандартам ISO 834-4 (стены), ISO 834-5 (плиты перекрытий и покрытий), ISO 834-6 (балки, прогоны, фермы и другие растянутые элементы), ISO 834-7 (колонны), ISO 834-8 (перегородки), а также положений расчетных методов и методик, в том числе табличных данных, представленных в ТКП EN 1992-1-2, разделе 6 ТКП 45-2.02-110, СП 5.03.01,

ТКП EN 1992-1-1, СН 2.01.03, определены основные параметры (показатели) изделий, в зависимости от классификации рассматриваемого изделия:

- геометрические параметры поперечного сечения (ширина b , высота h , диаметр D) – для несущих стержневых элементов;
 - расстояние от нагреваемой поверхности до оси арматуры c – для несущих элементов;
 - толщина t , в том числе эффективная t_{eff} , – для ограждающих изделий;
 - расстояния от боковой(-ых) нагреваемой(-ых) поверхности(-ях) до оси арматуры $c_{\omega,i}$ – для горизонтальных несущих стержневых элементов, подвергаемых огневому воздействию с двух перпендикулярных и более сторон;
 - критерий ХР при пожаре $F_{ХР}$ – для всех изделий;
 - уровень нагрузки при пожаре η_f (коэффициент использования несущей способности при пожаре η , уровень нагрузки n при нормальной температуре для вертикальных несущих элементов) – для несущих элементов;
 - условия опирания – для горизонтальных несущих элементов;
 - гибкость λ (расчетная длина l_0 (высота)) – для вертикальных несущих элементов;
 - эксцентриситет продольной силы e относительно центра поперечного сечения – для вертикальных несущих элементов;
 - коэффициент армирования ω – для вертикальных несущих элементов;
 - приведенный коэффициент температуропроводности бетона a_{red} – для всех изделий.
- К дополнительным параметрам (показателям) изделий относятся:
- длина пролета l_n – для горизонтальных несущих элементов;
 - отношение периметра поперечного сечения к площади поперечного сечения – для горизонтальных ограждающих несущих элементов;
 - расстояние от нагреваемой поверхности до пустот – для пустотелых изделий;
 - жесткость – для заземленных несущих элементов;
 - класс арматуры (характеристическая прочность арматуры) – для несущих элементов;
 - класс бетона (характеристическая прочность бетона на осевое сжатие) – для несущих элементов;
 - длина заанкеренной арматуры (включая длину выпуска за торцевую часть изделия) – для горизонтальных пустотелых несущих преднапряженных элементов;
 - степень предварительного напряжения – для несущих элементов с предварительно напряженной арматурой.

Влияние параметров (показателей) железобетонных изделий на их огнестойкость. Проведенный анализ требований существующих стандартов по распространению результатов испытаний на огнестойкость, влияния входных параметров (количественных и качественных показателей) на результаты расчетной оценки пределов огнестойкости и огневых испытаний позволил установить, что при прочих равных условиях огнестойкость конструкции, как правило, повышается:

- при увеличении геометрических параметров поперечного сечения (ширины, высоты, диаметра);
- при увеличении расстояния от i -й нагреваемой поверхности до оси арматуры (при увеличении толщины защитного слоя бетона для рабочей арматуры со стороны i -й нагреваемой поверхности и увеличении диаметра арматуры);
- при увеличении толщины, в том числе эффективной, изделия (увеличении отношения объема бетона к геометрическому объему изделия);
- при уменьшении критерия ХР при пожаре;
- при уменьшении уровня нагрузки (коэффициент использования несущей способности) при пожаре, уровня нагрузки при нормальной температуре;
- при изменении шарнирного опирания на жесткое защемление (увеличении статической неопределимости);
- при уменьшении гибкости (расчетной длины (высоты) изделия);

- при уменьшении эксцентриситета продольной силы относительно центра поперечного сечения;
- при уменьшении коэффициента армирования;
- при уменьшении приведенного коэффициента температуропроводности;
- при уменьшении длины пролета;
- при уменьшении отношения периметра поперечного сечения к площади поперечного сечения;
- при уменьшении расстояния от нагреваемой поверхности до пустот;
- при уменьшении жесткости изделия;
- при уменьшении класса арматуры (для арматуры классов S500 (A500, A-III) (включ.));
- при увеличении длины заанкеренной арматуры (включая длину выпуска за торцевую часть изделия);
- при уменьшении класса бетона (для бетонов до класса C⁵⁰/₆₀ (B60) (включ.));
- при уменьшении степени предварительного напряжения (для арматуры классов S800, A600, A-IV и выше).

Порядок выбора типового представителя. Критериями для выбора типовых представителей являются основные и дополнительные (в случае необходимости) параметры (показатели) изделий серии, а также параметры испытательной установки. Общий алгоритм выбора типового представителя для испытаний на огнестойкость приведен на рисунке 2.

Для выбора типового представителя для всех изделий серии в соответствии с их классификацией на начальном этапе определяются общие и частные параметры, затем устанавливаются основные и дополнительные параметры. Параметры изделий, установленные из серии, подлежат приведению к базовым показателям.

Далее изделия, обладающие схожими количественными и (или) качественными показателями, группируются по соответствующим параметрам²⁶. В случае одинакового значения параметра (показателя) для всех изделий в серии указанный параметр (показатель) допускается не учитывать и соответствующую группу не формировать. Схожесть параметров (показателей) определяется их полным соответствием или попадание в один диапазон (интервал) значений параметров (показателей)²⁷. Диапазон параметров (показателей), при которых изделия считаются схожими, определяется техническим экспертом по сертификации в зависимости от параметра (показателя). Каждое изделие серии относится только к одной группе по каждому параметру (показателю), выступающему в качестве критерия.

Сформированные группы по каждому параметру (показателю) ранжируются. Ранг группы изделий по параметру (показателю) определяется влиянием значения параметра (показателя) в этой группе на огнестойкость. Ранг группы по параметру (показателю) ниже в случаях, когда огнестойкость конструкции при прочих равных условиях выше. Количество рангов среди всех групп по параметру (показателю) соответствует числу сформированных групп изделий по этому параметру (показателю). Ранг 1 считается более высоким по сравнению с рангом 2, а ранг 2 более высоким по сравнению с рангом 3 и т.д. Группа с рангом 1 является

²⁶ Например, группы по расстоянию от нагреваемой поверхности до оси арматуры, группы по длине пролета, группы по толщине изделия, группы по ширине изделия, группы по уровню нагрузки при пожаре, группы по классу бетона, группы по классу рабочей арматуры и др.

²⁷ Например, по показателю «расстояние до оси арматуры», исходя из допусков (допустимых отклонений) диаметра арматуры от номинальных значений, изделия, имеющие расстояние до оси арматуры от 18 до 20 мм (включ.) попадают в одну группу, а со значением от 20 до 22 мм (включ.) – в другую, от 22 до 24 мм (включ.) – в третью. По показателю «длина пролета», учитывая возможные варианты глубины опирания согласно серии, изделия с пролетом (или длиной) от 4200 до 4500 мм (включ.) попадают в одну группу, от 4500 до 4800 мм (включ.) – в другую, от 4800 до 5100 мм (включ.) – в третью и т.д.

представительной группой по параметру²⁸. Неблагоприятность сочетания параметров изделия при оценке огнестойкости определяется количеством представительных групп и (или) групп соответствующих рангов по основным и дополнительным параметрам, к которым отнесено указанное изделие.



Рисунок 2. – Общий алгоритм выбора типового представителя

²⁸ По показателю «расстояние до оси арматуры» сформировано три группы: в первую вошли изделия с расстоянием до оси арматуры от 18 до 20 мм (включ.), во вторую – от 20 до 22 мм (включ.), в третью – от 22 до 24 мм (включ.). Поскольку уменьшение расстояния до оси арматуры при прочих равных условиях приводит к снижению огнестойкости изделия, ранг 1 присваивается первой группе, ранг 2 – второй группе, ранг 3 – третьей группе. Группа изделий № 1 по показателю «расстояние до оси арматуры» считается представительной.

В качестве типового представителя серии принимается изделие, имеющее такое сочетание количественных и качественных показателей (неблагоприятное), которое (по сравнению с остальными изделиями серии) свидетельствует о его более низкой огнестойкости, т.е. изделие, попавшее в наибольшее число представительных групп по основным параметрам (показателям), а при равенстве представительных групп по основным параметрам (показателям) – изделие, попавшее в наибольшее число представительных групп по дополнительным параметрам (показателям). Определенное таким образом количество типовых представителей серии может быть отличным от одного. В этом случае формируется перечень (потенциальных) типовых представителей. Наибольшая достоверность при распространении результатов испытаний на всю серию изделий достигается испытанием всех изделий, вошедших в такой перечень. Вместе с тем для оптимизации количества испытаний по решению технического эксперта по сертификации могут быть использованы следующие подходы для выбора типового представителя:

- проведение расчета огнестойкости всех изделий, вошедших в перечень (потенциальных) типовых представителей (в этом случае достигается наибольшая степень детализации) и принятие для испытаний изделия с наименьшей теоретической огнестойкостью;
- выбор изделия из перечня (потенциальных) типовых представителей, попавшего в наибольшее число групп по основному параметру, а в случае необходимости – по дополнительному, с рангом 2. Указанная процедура повторяется до тех пор, пока во внимание не будут приниматься группы с рангом²⁹ $N \leq 3$;
- выбор изделия из перечня (потенциальных) типовых представителей, отвечающего в наибольшей степени средневзвешенным параметрам изделий, вошедших в указанный перечень;
- на основании более подробного анализа конструктива изделий, вошедших в перечень (потенциальных) типовых представителей;
- выбор изделия из перечня (потенциальных) типовых представителей, имеющего более высокий (по отношению к другим изделиям) ранг группы по наиболее значимому параметру (показателю)³⁰.

После выбора типового представителя проводится сопоставление параметров испытательной установки с параметрами (показателями) типового представителя на предмет установления возможности его испытания на огнестойкость. В случае невозможности проведения стандартных огневых испытаний по ГОСТ 30247.0, ГОСТ 30247.1 следует провести натурные огневые испытания³¹ или расчет огнестойкости типового представителя.

Дополнительному испытанию на огнестойкость подлежит изделие из серии, обладающее максимальным значением $F_{ХР}$, если для типового представителя $F_{ХР} < 6$, а в серии имеются изделия с $F_{ХР} > 4$.

Перед испытанием типового представителя должны быть подтверждены следующие физико-механические параметры материалов:

- характеристическая (гарантированная) прочность бетона на сжатие;
- характеристическая прочность (сопротивление) арматуры;
- весовая влажность и теплофизические свойства бетона;
- состав бетонной смеси и ее качество.

²⁹ Рекомендуемое значение. Окончательное решение принимается техническим экспертом по сертификации с учетом технико-экономических показателей продукции.

³⁰ Значимость основного (дополнительного) параметра (показателя) определяется техническим экспертом по сертификации или порядком их изложения в разделе «Выделение основных и дополнительных параметров железобетонных изделий при выборе типового представителя».

³¹ Натурные огневые испытания – огневые испытания изделий в составе зданий (конструкций) на строительном объекте с целью установления фактических значений огнестойкости согласно требованиям норм проектирования и проектной документации.

При выборе типового представителя серии изделий рам и блоков объемных последовательно используются подходы выбора типового представителя для их составных элементов. Для выбора типового представителя узлов соединений их элементов необходимо исходить из условия их соответствия требованиям нормальной эксплуатации³². При этом предел огнестойкости узла должен быть не менее предела огнестойкости составного элемента рамы (блока объемного), обладающего более низкой огнестойкостью³³. Следует отметить, что для указанных изделий, а также балок, прогонов, ригелей изложенные в работе подходы по выбору типового представителя для испытаний могут быть взяты за основу при выборе изделия (изделий) из серии для расчета огнестойкости, а также могут быть применены с учетом перспективы расширения перечня продукции, испытываемой на полигоне НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси. Их рассмотрение в разрезе испытаний по ГОСТ 30247.0 и ГОСТ 30247.1 при оценке соответствия техническим требованиям в настоящее время носит теоретический характер.

Заключение

Обеспечение огнестойкости строительных конструкций является неотъемлемой составляющей обеспечения соответствия зданий (сооружений) существенным требованиям безопасности. Требуемые (предписывающие) пределы огнестойкости строительных конструкций варьируются в широких диапазонах в зависимости от их области применения и назначения. Собственный (фактический) предел огнестойкости железобетонной конструкции (изделия) зависит от характеристик бетона и арматуры, условий ее применения, конструктива, технологии изготовления и других факторов. Указываемое в сериях рабочих чертежей значение предела огнестойкости должно основываться на возможных областях применения изделий серии, с учетом разрабатываемого для них конструктива, подбора физико-механических и теплофизических характеристик бетона и арматуры, предполагаемых эксплуатационных факторов.

При проведении сертификационных испытаний до момента отсутствия расчетных пределов огнестойкости для всех изделий в серии в качестве типового представителя для испытаний на огнестойкость должно выступать изделие из серии, потенциально обладающее наиболее низкой огнестойкостью (собственным пределом огнестойкости). В этом случае установленный результат испытаний позволяет сделать более корректно общий вывод о серии (партии) продукции и получить документ об оценке ее соответствия техническим требованиям.

Проведенный анализ требований существующих стандартов по распространению результатов испытаний на огнестойкость, а также влияния количественных и качественных показателей железобетонных изделий на результаты расчетной оценки пределов огнестойкости и огневых испытаний, позволил установить:

- классификацию железобетонных изделий, необходимую для установления перечня параметров (показателей), определяющих их огнестойкость и дающих возможность выбора из перечня изделия, потенциально обладающего наиболее низкой огнестойкостью;
- основные и дополнительные (используемые при прочих равных основных) параметры (показатели) железобетонных изделий, которые следует учитывать при выборе типового представителя;
- порядок приведения показателей железобетонных изделий к базовым;
- порядок ранжирования железобетонных изделий по параметрам, влияющим на их огнестойкость.

³² В первом приближении в качестве узла в типовом представителе должен выступать узел, в котором расстояние до оси арматуры минимально.

³³ Целесообразным в этом случае является проведение натуральных огневых испытаний.

На основе полученных результатов определены критерии выбора типовых представителей железобетонных изделий для проведения испытаний на огнестойкость при проведении процедур по оценке соответствия техническим требованиям. Предлагаемый подход учитывает конструктивные и структурные особенности рассматриваемых железобетонных изделий серии. Данный подход повышает уровень безопасного использования документов об оценке соответствия железобетонных изделий, применяемых в качестве строительных конструкций. Полученные результаты включены в соответствующий раздел Положения по выбору типовых представителей железобетонных изделий для проведения испытаний по определению прочности, жесткости, трещиностойкости, предела огнестойкости при проведении процедур по оценке соответствия.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования установленных критериев при корректировке содержания серий (рабочих чертежей), конструировании железобетонных изделий, а также при выборе типовых представителей для испытаний в рамках оценки (подтверждения) соответствия серии железобетонных изделий техническим требованиям.

Перспективным для модернизации разработанного подхода по выбору типового представителя является многокритериальный анализ, или Multiple-criteria decision analysis (MCDA), учитывающий научно обоснованные взвешивающие коэффициенты для различных параметров (показателей) железобетонных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полевода, И.И. Огнестойкость современных строительных конструкций из железобетона: монография / И.И. Полевода, С.М. Жамойдик, Н.В. Зайнудинова, Д.С. Нехань; под ред. И.И. Полеводы. – Минск: УГЗ, 2023. – 420 с. – ISBN: 978-985-590-194-6.
2. Сорока, А.В. Характеристика спроса и предложения и их свойств на рынке ЖБИ Беларуси / А.В. Сорока, Д.А. Жук // 72-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов: тез. докл., 12–23 апр. 2021 г., г. Минск: в 4 ч. – Минск: БГТУ, 2021. – Ч. 3. – С. 67–68.
3. Давидюк, А.Н. Бетон в строительстве – новые вызовы и перспективы / А.Н. Давидюк // Вестник НИЦ «Строительство». – 2017. – № 1 (12). – С. 5–13. – EDN: YINMWP.
4. Ройтман, В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В.М. Ройтман. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.

**Критерии выбора типовых представителей железобетонных изделий
для проведения сертификационных испытаний на огнестойкость**
**Criteria for selecting typical representatives of reinforced concrete products
for certification fire resistance tests**

Нехань Денис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, доцент
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск
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»,
Chair of Fire Safety, Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Belarus, Minsk
Email: denis_nechany@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7838-4663

Полевода Иван Иванович

доктор технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь»,
начальник университета
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: ip@ucp.by
SPIN-код: 1662-9457

Ivan I. Palevoda

Grand PhD in Technical Sciences,
Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Head of University
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: ip@ucp.by
ORCID: 0000-0003-2469-3553

Зайнудинова Наталья Владимировна

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», отдел планирования,
стандартизации и методического обеспечения
образовательного процесса, 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 Planning, Standardization
and Methodological Support of the Educational
Process, Head of Department
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: Zainudzinava@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1848-1562

Ивлев Юрий Петрович

Учреждение «Научно-исследовательский
институт пожарной безопасности
и проблем чрезвычайных ситуаций»
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь, начальник
испытательно-исследовательского полигона
Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, Минск, Беларусь
Email: ivlev_83@outlook.com

Yuriy P. Ivlev

Institution «Scientific and Research Institute
of Fire Safety and Emergency Situations»
of the Ministry for Emergency Situations
of the Republic of Belarus,
Head of the Testing and Research Ground
Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus
Email: ivlev_83@outlook.com

Ботян Сергей Сергеевич

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

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

Email: aseckis@mail.ru

SPIN-код: 5948-1623

Sergey S. Botyan

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

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

Email: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Лишай Игорь Леонидович

Научно-проектно-производственное
республиканское унитарное предприятие
«Стройтехнорм», генеральный директор

Адрес: ул. Кропоткина, 89,
220002, г. Минск, Беларусь

Email: lishay@stn.by

Igor L. Lishay

Scientific Designing-Manufacturing Republican
Unitary Enterprise «STROYTEKHNORM»,
General Director

Address: Kropotkina str., 89,
220002, Minsk, Belarus

Email: lishay@stn.by

CRITERIA FOR SELECTING TYPICAL REPRESENTATIVES OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS FOR CERTIFICATION FIRE RESISTANCE TESTS

Nekhan' D.S., Palevoda I.I., Zaynudinova N.V., Ivlev Yu.P., Botyan S.S., Lishay I.L.

Purpose. To establish criteria for selecting typical representatives of reinforced concrete products for testing to determine the fire resistance during conformity assessment procedures for technical requirements.

Methods. Generalization of approaches to the extension of the results of fire resistance tests of building structures and theoretical methods for assessing fire resistance of building structures. Analysis of the influence of quantitative and qualitative indicators of reinforced concrete products on their theoretical fire resistance, as well as the results of fire tests, including the extension of fire test results.

Findings. An algorithm has been developed and criteria for selecting typical representatives of reinforced concrete products for fire resistance certification tests have been defined, based on a comprehensive analysis of simplified methods and existing tabular data on fire resistance assessment. Their application makes it possible to ensure fire safety of buildings by selecting a reinforced concrete product for fire resistance certification tests, the structural and design features of which indicate that it potentially has the lowest fire resistance of all products in the series.

Application field of research. The obtained results can be used in the design of reinforced concrete structures, as well as in the design of buildings and structures. Certification bodies can use the obtained results within the framework of assessment (confirmation) of conformity of a series of reinforced concrete products to technical requirements when selecting typical representatives of reinforced concrete products for testing. The results obtained in the present work are included in the «Regulations on the selection of typical representatives of reinforced concrete products for testing to determine strength, stiffness, crack resistance, fire resistance during conformity assessment procedures».

Keywords: reinforced concrete products, fire resistance, fire resistance limit, fire tests, typical representative, criteria for selecting, conformity assessment, technical requirements, concrete cover thickness.

(The date of submitting: January 14, 2025)

REFERENCES

1. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Zaynudinova N.V., Nekhan' D.S. *Ognestoykost' sovremennykh stroitel'nykh konstruksiy iz zhelezobetona* [Fire resistance of modern reinforced concrete building structures]: monograph. Ed. by I.I. Palevoda. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 420 p. (rus). ISBN: 978-985-590-194-6.
2. Soroka A.V., Zhuk D.A. *Kharakteristika sprosa i predlozheniya i ikh svoystv na rynke ZhBI Belarusi* [Characteristics of supply and demand and their properties in the Belarusian reinforced concrete market]. *Proc. of 72nd scientific and technical conf. of pupils, students and master's students, Minsk, April 12–23, 2021*. In 4 parts. Part 3. Minsk: BSTU, 2021. Pp. 67–68. (rus)
3. Davidyuk A.N. *Beton v stroitel'stve – novye vyzovy i perspektivy* [Concrete construction – new challenges and prospects]. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2017. No. 1 (12). Pp. 5–13. (rus). EDN: YINMWP.
4. Roytman V.M. *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemykh i rekonstruiруemykh zdaniy* [Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow: Association «Pozharnaya bezopasnost' i nauka», 2001. 382 p. (rus)

Copyright © 2025 Nekhan' D.S., Palevoda I.I., Zaynudinova N.V.,

Ivlev Yu.P., Botyan S.S., Lishay I.L.

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

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЖАРА ПО НАРУЖНЫМ ОГРАЖДАЮЩИМ КОНСТРУКЦИЯМ НА ВЫШЕЛЕЖАЩИЕ ЭТАЖИ

Ботян С.С., Нехань Д.С., Полевода И.И., Шатило Э.Э.

Цель. На основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработать методику проведения испытаний по оценке влияния конструктивных решений фасадов зданий, на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи.

Методы. Обзор, анализ и сравнение результатов проведенных экспериментальных и теоретических исследований в области распространения пожара по наружным ограждающим конструкциям зданий и сооружений.

Результаты. Проведен обзор научной и нормативной литературы по устройству конструктивных решений фасадов, влияющих на распространение пожара на вышележащие этажи, а также обзор методик оценки их огнестойкости и пожарной опасности. Определены классификационные показатели конструктивных решений, влияющие на распространение пожара по фасадам зданий. На основании полученных данных разработана методика проведения испытаний по оценке влияния конструктивных решений фасадов зданий на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи. Сформулированы общие положения, цель и задачи методики испытаний. Определены параметры испытательных фрагментов здания. Определены расчетные сценарии пожаров (время огневого воздействия, место расположения очага пожара, вид и количество пожарной нагрузки, источник зажигания). Проведена оценка параметров, влияющих на динамику пожара, и определены параметры, которые следует регистрировать в ходе испытаний, а также критерии достижения предельного состояния по пожароустойчивости конструктивных решений фасадов.

Область применения исследований. Разработка и совершенствование требований строительных норм. Проектирование и строительство многоэтажных и высотных зданий.

Ключевые слова: конструктивные решения, фасад, методика, огневые испытания, пожар, пожарная опасность, пожароустойчивость.

(Поступила в редакцию 14 января 2025 г.)

Введение

Современный опыт проектирования и строительства зданий повышенной этажности показывает, что горючие утеплители, а также светопрозрачные конструкции фасадов с применением стеклянных изделий широко применяются и используются при разработке современных ограждающих конструкций зданий.

Пожары в многоэтажных зданиях характеризуются быстрым распространением по наружным ограждающим конструкциям (фасадам) в вертикальном направлении через оконные проемы или по светопрозрачным элементам как при использовании конструкций и/или систем утепления с горючим наполнителем, так и с негорючими материалами. Развитию пожара по фасаду способствуют такие факторы, как мощность очага пожара, горючая отделка фасада, внешние условия (ветер, конвективные потоки, неограниченное количество кислорода, разница давлений внутри и снаружи здания).

В качестве примеров резонансных пожаров (рис. 1) можно привести следующие:

– пожар, произошедший 19 мая 2015 г. в многоэтажном доме в г. Баку (Азербайджанская Республика), в результате которого погибли 15 человек, а также 63 человека были госпитализированы. Особенностью указанного пожара являлось то, что пламенем был охвачен весь фасад здания в первые минуты с момента возгорания;



а – г. Грозный (РФ)



б – г. Баку (Азербайджанская Республика)

Рисунок 1. – Внешний вид фасадов при пожаре в высотных зданиях

– пожар, произошедший 3 апреля 2013 г., в одном из высотных зданий комплекса «Грозный-Сити» в г. Грозный (Российская Федерация), в результате которого нанесен материальный ущерб на сумму более 5 млн долларов США¹, погибших и пострадавших нет.

Особенностью пожаров снаружи зданий является наличие вертикально направленных ветровых потоков, формирующих мощные тепловые потоки вдоль плоскости фасада. Это становится причиной разрушения светопрозрачного заполнения на вышерасположенных этажах и перехода пожара на верхние этажи, а также по горизонтали.

Основная часть

Обзор научной и нормативной литературы по устройству конструктивных решений, влияющих на распространение пожара на вышележащие этажи. К наружным конструкциям зданий (фасадам) предъявляется ряд требований к обеспечению огнестойкости и пожарной опасности, а также перечень конструктивных решений, направленных на ограничение распространения пожара на вышерасположенные этажи. К конструктивным решениям относят:

- устройство противопожарных штор;
- устройство междуэтажных поясов из негорючих материалов;
- устройство козырьков из негорючих материалов;
- нормирование расположения оконных проемов относительно друг друга;
- нормирование огнестойкости заполнений оконных проемов и др.

Анализ требований технических нормативных правовых актов (далее – ТНПА) и научной литературы по рассматриваемой тематике показывает, что данным вопросом занималось достаточно большое количество ученых из разных стран мира.

Согласно национальным требованиям, изложенным в СН 2.02.05-2020², в наружных стенах зданий для ограничения распространения пожара через оконные проемы на вышерасположенные этажи расстояние по вертикали между проемами должно быть не менее чем

¹ Ущерб от пожара в комплексе «Грозный-сити» оценен в 200 миллионов рублей // belta.by – БелТа / Новости Беларуси. – 2013. – 8 апр. – URL: <https://belta.by/world/view/uscherb-ot-pozhara-v-komplekse-groznyj-siti-otsenen-v-200-millionov-rublej-12188-2013/> (дата обращения: 03.01.2025).

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

1,2 м. Примечательно, что указанные расстояния не нормируются, если перекрытие или другая конструкция из негорючих материалов выступает на расстояние не менее 0,2 м за наружную ограждающую конструкцию или облицовку на отnose классов пожарной опасности КН2 и КН3 либо помещения с указанными проемами оснащены установками автоматического пожаротушения. Вместе с тем, если перекрытие у наружной стены является противопожарным, то оно должно пересекать и выступать не менее чем на 0,3 м за плоскость наружных стен (вентилируемого фасада) зданий, но только если стены и (или) система утепления с внешней стороны (облицовка) выполнены из конструкций классов пожарной опасности К1–К3 и КН1–КН3 соответственно. При этом с помощью такого конструктива решается одна и та же задача.

Привлекает внимание тот факт, что в случае несоблюдения указанного расстояния величиной в 1,2 м действующие требования нормируют не предел огнестойкости конструкций, которые пересекают наружную ограждающую конструкцию или облицовку, а лишь их горючесть. Обеспечит ли выступающая на 0,2 м за наружную ограждающую конструкцию или облицовку на отnose конструкция, выполненная из негорючих материалов, но не обладающая нормированной огнестойкостью? Вопрос остается до конца не изученным и научно необоснованным. Следует отметить также, что в ранее действовавшем ТКП 45-2.02-315-2018³ расстояние 1,2 м не нормировалось, если перекрытие или другая конструкция обеспечивает требуемые пожарно-технические характеристики узлов сопряжения строительных конструкций (предел огнестойкости и класс пожарной опасности) и выступает за наружную стену (облицовку, фасадную систему) на расстояние не менее 0,2 м либо при заполнении проемов противопожарными окнами.

Требования к высоте междуэтажного пояса в разных странах отличаются: в США высота его должна составлять не менее 36 дюймов (0,914 м), в Великобритании – не менее 1 м, в Австралии – не менее 0,9 м, в России, как и в Швеции – не менее 1,2 м [1, с. 25].

Требования по устройству так называемых козырьков существуют в ТНПА некоторых стран мира. Так, в США длина козырька должна быть не менее 30 дюймов (0,762 м), в Австралии – не менее 1,1 м [1, с. 25]. По требованиям действующего в Российской Федерации СП 2.13130.2020⁴ противопожарные перекрытия должны разделять здание и выступать на 30 см от плоскости, допускается заменять такие козырьки междуэтажными поясами высотой 1,2 м с пределом огнестойкости не менее Е60. Вместе с тем результаты экспериментальных исследований и численного моделирования, представленные в работе [2], показали, что перпендикулярный стене козырек, выступающий на 0,74 м за плоскость наружных стен, не позволяет пламени разрушить вышележащее окно.

Результаты проведенных экспериментальных исследований [3] показали, что междуэтажный пояс высотой 1,2 м не способен препятствовать распространению пожара на вышележащие этажи при площади разрушения оконного проема более 1,82 м². Также указанные исследования позволили установить существенные различия в характере поведения светопрозрачных конструкций при развивающемся пожаре и резком воздействии на стеклопакет языков пламени пожара, вышедших наружу. В отличие от внутреннего пожара, наружный интенсивнее воздействует на фасад здания. Значения температуры выходящего пламени, а также тепловых потоков достигают критических для светопрозрачных конструкций, что приводит к их разрушению и переходу пламени на вышележащие этажи.

³ Пожарная безопасность зданий и сооружений. Строительные нормы Республики Беларусь: ТКП 45-2.02-315-2018. – Взамен ТКП 45-2.02-92-2007 (02250), ТКП 45-2.02-142-2011 (02250), ТКП 45-2.02-242-2011 (02250), ТКП 45-2.02-279-2013 (02250), СНиП 2.01.02-85*, СНиП 2.01.02-85*. – Введ. 01.09.2018. – Минск: Минстройархитектуры, 2018. – 57 с.

⁴ Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты: СП 2.13130.2020. – Взамен СП 2.13130.2012. – Введ. 12.09.2020. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2020. – 29 с.

Касательно фасадов, выполненных из стеклянных изделий, следует отметить, что они характеризуются низкими значениями огнестойкости. Данный факт связан с низкой устойчивостью при повышенных и высоких температурах как каркаса фасада (критическая температура алюминиевых профильных систем в зависимости от марки сплавов и нагрузок находятся в интервале от 200 до 350 °С⁵, а стальных комбинированных профилей – 350 °С⁶), так и светопрозрачного заполнения стекла. Стекло характеризуется низкой прочностью при воздействии повышенных и высоких температур, что приводит к его разрушению на начальной стадии пожара и дальнейшему распространению пожара на вышележащие этажи. Разрушение стекла происходит, когда скорость нарастания внутренних напряжений превышает скорость их релаксации. При нагреве внутри стекла так же, как и при ударе, возникают внутренние напряжения, скорость их нарастания зависит от характера развития пожара, свойств стекла, геометрических параметров стеклянной пластины.

Существующая теория разрушения стекла в условиях пожара отталкивается от результатов экспериментальных исследований. Теоретический анализ работ [4–8], посвященных характеру разрушения стекла в условиях пожара, позволяет выделить критерии, при которых происходит его разрушение (потеря целостности):

– достижение критического значения поверхностной плотности падающего теплового потока (20...30 кВт/м² – для одно- и двухкамерных стеклопакетов размером 0,61×0,61 м и 0,91×1,5 м, 9 кВт/м² – листовое стекло размером 0,5×0,5 м толщиной 3 мм);

– разница температур между открытой (подверженной огневому воздействию) и закрытой поверхностью стеклянной пластины (для образцов размером 370×270 мм 60 °С при толщине стеклянной пластины 4 мм; 95 °С – при 5 мм; 129 °С – при 6 мм)⁷;

– температура на поверхности стекла (110 °С – для листового стекла толщиной 6 мм, 330...380 °С – для закаленного стекла толщиной 6 мм, 470...590 °С – для закаленного стекла толщиной 10 мм).

Огнестойкие светопрозрачные фасады характеризуются высокой стоимостью, что объясняет их ограниченное применение. Широкое распространение получили фасады со светопрозрачным заполнением без нормируемого предела огнестойкости, с учетом выполнения ряда конструктивных мер и требований по ограничению распространения пожара в них. Однако, как показывает практика проектирования и строительства фасадов со светопрозрачным заполнением без нормируемого предела огнестойкости, не учитываются особенности развития пожара при выходе пламени на фасад здания и его переход на вышерасположенные этажи, не оцениваются особенности высотного строительства в части появления мощных ветровых и, как следствие, тепловых потоков.

В нормативных документах Российской Федерации⁸ для наружных стен зданий, имеющих светопрозрачные участки с ненормируемым пределом огнестойкости, а также оконные проемы или ленточное остекление, должны выполняться следующие конструктивные требования:

– участки наружных стен в местах примыкания к перекрытиям (междуэтажные пояса) следует выполнять глухими (неоткрывающимися), высотой не менее 1,2 м;

– предел огнестойкости междуэтажных поясов (в том числе узлов примыкания и крепления) должен приниматься с численными значениями: по потере целостности (Е) – как для примыкающего перекрытия, по потере теплоизолирующей способности (И) и достижению

⁵ Еврокод 9. Проектирование алюминиевых конструкций. Часть 1–2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1999-1-2-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 91 с.

⁶ Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1993-1-2-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 77 с.

⁷ О. Keski-Rahkonen установлено, что критической является разница температур примерно в 80...100 °С между нагреваемой и ненагреваемой поверхностью стекла.

⁸ См. сноску 4.

предельной величины плотности теплового потока на нормируемом расстоянии (W) – как для наружных стен.

В Республике Беларусь существует ряд стандартов СТБ EN 1364-3-2009⁹, СТБ EN 1364-4-2009¹⁰, СТБ 1761-2007¹¹, СТБ 1961-2009¹², используемых для оценки огнестойкости и пожарной опасности фасадов и облицовки зданий, а также эффективности их конструктивных решений в части ограничения распространения пожара на вышерасположенные этажи.

Экспериментальный метод оценки реакции облицовки фасада на воздействие пламени, выходящего через оконный проем, в соответствии с СТБ 1761-2007 (ISO 13785-2:2002) гармонизирован с методикой оценки пожарной опасности систем утепления и облицовок наружных стен зданий согласно СТБ 1961-2009. Следует отметить, что рассмотренные методы применимы для сплошных облицовок и фасадов зданий, в которых возможно устройство оконных проемов. Поскольку светопрозрачное заполнение характеризуется быстрым разрушением при воздействии пожара, что, в свою очередь, приводит к его быстрому распространению на вышележащие этажи, при экспериментальной оценке пожарной опасности учитывается ограничение перехода пожара на смежные этажи. Особенностью исследуемых образцов является обязательный простенок высотой не менее 1 м между верхом оконного проема нижележащего этажа и низом оконного проема вышележащего этажа, что, в свою очередь, не до конца согласуется с устройством междуэтажного пояса, рассмотренного ранее, высотой не менее чем 1,2 м.

Методы оценки огнестойкости систем светопрозрачных навесных фасадов, изложенные в СТБ EN 1364-3-2009, СТБ EN 1364-4-2009, являются аутентичными международным стандартам EN 1364-3:2006, EN 1364-4:2007. Эти методы позволяют провести оценку огнестойкости светопрозрачных фасадов (с огнестойким и не огнестойким остеклением) при размещении пожарной нагрузки с внутренней и наружной стороны, с учетом особенностей разрушения конструкций фасадов (надоконных/подоконных панелей, горизонтальных и вертикальных уплотнений швов строительных элементов, а также креплений для присоединения навесного фасада к элементу перекрытия). Из сказанного следует, что методы испытаний на огнестойкость и пожарную опасность фасадов, изложенные в национальных стандартах Республики Беларусь, не в полной мере учитывают особенности конструктивного исполнения и поведения светопрозрачного фасада при высокотемпературном воздействии, что не позволяет объективно оценить влияние конструктивного исполнения на распространение пожара между этажами, а также огнестойкость светопрозрачного фасада с применением стеклянных изделий. Стандарты, гармонизированные с европейскими, и изложенные в них методики испытаний отражают условия развития пожара внутри помещений и позволяют оценить способность конструкции к предотвращению перехода пожара на смежные этажи.

При оценке огнестойкости отдельной светопрозрачной конструкции учитывается достижение предельного состояния на необогреваемой поверхности конструкции и не учитывается выход пламени из помещения и дальнейшее его распространение на вышележащий этаж. При этом результаты научных теоретических и экспериментальных трудов [4; 5; 9] показывают, что пламя, выходящее из окна горящего помещения, способно разрушить светопрозрачное остекление, расположенное над этажом пожара, и привести к ускорению процесса распространения пожара по зданию.

⁹ Испытания на огнестойкость. Элементы зданий, не несущие нагрузки. Часть 3. Наружные фасады. Полная конфигурация: СТБ EN 1364-3-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси, 2010. – 54 с.

¹⁰ Испытания на огнестойкость. Элементы зданий, не несущие нагрузки. Часть 4. Наружные фасады. Частичная конфигурация: СТБ EN 1364-4-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси, 2010. – 82 с.

¹¹ Испытания фасадов на воздействие пожара. Часть 2. Крупномасштабные испытания: СТБ 1761-2007 (ISO 13785-2:2002). – Введ. 01.01.2008. – Минск: РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», 2008. – 24 с.

¹² Конструкции строительные. Методы определения пожарной опасности: СТБ 1961-2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», 2009. – 26 с.

Таким образом, выполненный анализ классификационных показателей и конструктивных решений фасадов зданий, а также особенностей методик оценки их огнестойкости и пожарной опасности (рис. 2) позволяет сделать вывод о необходимости комплексной и всесторонней экспериментальной оценки эффективности применяемых решений, влияющих на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи.



Рисунок 2. – Классификационные показатели, влияющие на распространение пожара по фасаду здания

Результаты планируемых экспериментальных исследований позволят оценить критерии безопасности рассматриваемых решений, гармонизировать методы экспериментальной оценки огнестойкости с национальными требованиями ТНПА, а также усовершенствовать противопожарные требования, предъявляемые к фасадам зданий.

Методика проведения экспериментальных исследований. Цель испытаний – оценить эффективность применяемых в Республике Беларусь конструктивных решений фасадов зданий в части ограничения распространения пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи зданий.

Сущность методики испытаний на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи зданий заключается в определении времени от начала теплового воздействия в соответствии с настоящей методикой до наступления одного или последовательно нескольких предельных состояний по пожароустойчивости¹³.

Область применения методики. Методика определяет алгоритм и общие требования к проведению испытаний по оценке влияния конструктивных решений фасадов зданий на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи зданий. Оценке эффективности подвергаются следующие конструктивные решения:

¹³ Пожароустойчивость фасада (конструктивного решения) – способность фасада (конструктивного решения) исключить разрушение и ограничивать переход пожара на смежные этажи в условиях создаваемого пожара.

- расположение оконных проемов на расстоянии по вертикали, не превышающем величину 1,2 м;
- устройство между оконными проемами козырьков из негорючих материалов величиной не менее 0,2 м;
- устройство глухого простенка величиной не менее 1,2 м для зон ожидания (отстоя) людей при пожаре в зданиях в части;
- устройство витражных фасадов зданий (выполненных из стеклянных изделий).

Параметры испытательного стенда. Для проведения натуральных огневых испытаний был спроектирован и возведен испытательный стенд, представляющий собой фрагмент трехэтажного здания размером 12×12×10 м. Испытательный стенд запроектирован с плоскими монолитными дисками перекрытия и монолитными стенами. Прочность, устойчивость и пространственная жесткость здания обеспечивается совместной работой вертикальных конструкций (монолитных стен) и монолитного перекрытия. Фундамент ленточный из бетона класса $C^{25}/_{30}$. Вертикальные несущие конструкции здания – стены из монолитного бетона класса $C^{25}/_{30}$, толщиной 220 мм. Перекрытия – сплошные монолитные диски из бетона класса $C^{25}/_{30}$, толщиной 220 мм. Лестничные марши и площадки выполнены монолитными из бетона класса $C^{25}/_{30}$. Для защиты железобетонных конструкций от трещинообразования в бетоне и возможности проведения многократных опытов в соответствующих зонах перед проведением испытаний выполняется защита внутренних поверхностей стен и перекрытий минераловатными плитами на негорючей основе.

Испытательный стенд включает три вида фрагментов:

Фрагмент № 1. Конструктивное решение, включающее выступающие элементы (козырьки, негорючие перекрытия или иные конструкции из негорючих материалов). Очаг пожара находится в помещении 1-го этажа. Одной из целей испытаний является оценка влияния указанного конструктивного решения на ограничение распространения пожара между этажами.

Фрагмент № 2. Конструктивное решение по нормированию расположения оконных проемов на расстоянии по вертикали 1,2 м, а также по устройству зоны для ожидания (отстоя) людей при пожаре в здании, в части устройства глухого простенка величиной 1,2 м. Очаг пожара находится в помещении 1-го этажа. В процессе указанных испытаний контролируется воспламенение пожарной нагрузки в смежных от пожара помещениях и распространение опасных факторов пожара на лоджию (зону отстоя людей при пожаре).

Фрагмент № 3. Конструктивное решение, по устройству витражного фасада здания (выполненного из стеклянных изделий). Очаг пожара находится в помещении 1-го этажа. Указанные испытания направлены на изучение поведения стеклянных фасадов на распространение пожара между этажами здания. Образец для испытаний должен состоять из системы навесного фасада и горизонтального продольного уплотнителя швов в местах соединений элементов и креплений к опорному перекрытию.

Расчетные сценарии пожара. Величина, способ размещения и характеристики применяемой для испытаний пожарной нагрузки основываются на нормативных подходах, условиях эксплуатации объекта, учитывают предпосылки наиболее неблагоприятных ситуаций воздействия опасных факторов пожара на исследуемые объекты.

Для проведения испытаний по фрагментам № 1 и 2 будет использована переменная пожарная нагрузка как для жилых помещений (согласно СН 2.01.03-2019¹⁴ и СТБ 2129¹⁵ удельная временная пожарная нагрузка составляет 948 МДж/м², в эквиваленте к древесине (с низшей теплотой сгорания 13,8 МДж/кг) – 69 кг/м²), для фрагмента № 3 – для офисных

¹⁴ Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Введ. 08.09.2020. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

¹⁵ Здания и сооружения. Порядок определения пожарной нагрузки: СТБ 2129-2010. – Введ. 01.07.2011. – Минск: Минстройархитектуры, 2011. – 30 с.

(согласно СН 2.01.03-2019 и СТБ 2129 удельная временная пожарная нагрузка составляет 511 МДж/м^2 , в эквиваленте к древесине (с низшей теплотой сгорания $13,8 \text{ МДж/кг}$) – 37 кг/м^2). Указанные значения переменной пожарной определены из распределения Гумбеля, при этом они не превышаются в течение 80 % интервала времени эксплуатации пожарной нагрузки в рассматриваемых помещениях¹⁶.

Реальная пожарная нагрузка, как правило, заменяется эквивалентной пожарной нагрузкой на основе древесины. На скорость тепловыделения при пожаре существенное влияние оказывает влажность древесины. Для испытаний должна использоваться древесина с весовой влажностью не более 15 %, которую необходимо измерять непосредственно перед испытанием. В дальнейшем при анализе результатов испытаний фактическая влажность древесины должна быть принята во внимание. В качестве горючего материала рекомендуется использовать бруски хвойных пород не ниже 3-го сорта сечением $(40 \pm 5) \text{ мм}$ и длиной $(800 \pm 10) \text{ мм}$.

Использование древесины плотностью 500 кг/м^3 с теплотой сгорания $13,8 \text{ МДж/кг}$ требует создания от 9 до 16 модельных очагов (в зависимости от испытательного фрагмента), состоящих из 242 брусков (24 ряда по 10 брусков и два опорных бруска размером $40 \times 40 \times 800 \text{ мм}$), номинальным размером $800 \times 800 \times 1000 \text{ мм}$. Модельный очаг устанавливается на металлические балки, выполненные высотой 200 мм и длиной не менее 1000 мм. Рекомендуется металлические балки (для всех очагов пожарной нагрузки) сварить (собрать) в единый каркас. При испытании должны оцениваться изменения массы и скорости выгорания пожарной нагрузки¹⁷.

Место расположения и способы размещения горючей нагрузки должны обеспечивать условия создания наиболее критической ситуации с точки зрения воздействия пожара на наружные конструкции фасада здания, а также отражать условия ее размещения, характерные для жилых/офисных помещений.

В качестве первичного источника пожара принимается очаг площадью проекции около $1,0 \text{ м}^2$, размещаемый в центре помещения. Розжиг начинается с внутренней части штабелей, расположенных в центральной части помещения. Для его воспламенения применяется дизельное топливо или керосин объемом $0,25 \text{ л}$ на один штабель, которым около $\frac{1}{4}$ части штабеля, обращенной к центру помещения, обливается перед началом испытаний. Розжиг следует проводить не менее чем 2 операторами с помощью предварительно изготовленных факелов с ручкой длиной от $0,7$ до $1,0 \text{ м}$. Следует равномерно пролить бруски, дать жидкости впитаться в древесину в течение от 1 до 3 мин. Розжиг считается завершенным с момента воспламенения не менее $\frac{1}{4}$ части четырех штабелей.

За продолжительность испытаний принимается минимальное значение среди времени:

- достижения предельного состояния по пожароустойчивости фасада (конструктивного решения);
- полного выгорания пожарной нагрузки;
- до момента снижения среднеобъемной температуры в помещении пожара до $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

¹⁶ См. сноску 14.

¹⁷ Данные об изменении массы пожарной нагрузки позволяют контролировать ход протекания экспериментов (воспроизводимость в ходе натурных испытаний результатов предварительных расчетов), провести сравнительный анализ справочных данных (для ранее проводимых исследований и лабораторных экспериментов) с получаемыми в ходе планируемых экспериментов, установить время наступления установившейся скорости выгорания пожарной нагрузки в зависимости от ее характеристик, параметров помещения при пожаре и т.д.

Получение экспериментальных данных по изменению массы пожарной нагрузки с заданными характеристиками: удельная массовая скорость выгорания, теплота сгорания, линейная скорость распространения пламени (заранее определенными в лабораторных условиях), с учетом параметров натурального фрагмента, позволит начать работу по приведению результатов лабораторных данных к натурным с учетом масштабного фактора и характеристик помещения, пополнить банк справочных данных.

При отсутствии угрозы для испытателей и принятия мер по тушению пожара (в случае необходимости) после достижения предельного состояния по пожароустойчивости фасада (конструктивного решения) допускается не прекращать огневые испытания и проводить измерения требуемых параметров.

Критерии достижения предельного состояния по пожароустойчивости конструктивных решений фасадов по ограничению распространения пожара. Для корректной и объективной оценки результатов испытаний необходимо сформулировать критерии, используемые для оценки достижения предельного состояния по пожароустойчивости фасада (конструктивного решения) в зависимости от его назначения. Исходя из используемых показателей для оценки предельных состояний по огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций и систем утепления, в настоящей методике приняты следующие критерии достижения предельного состояния по пожароустойчивости фасада (конструктивного решения):

1. Разрушение, обрушение или выпадение фрагментов светопрозрачного заполнения фасада и/или проема вышележащего этажа (при наличии элементов систем утепления, навесных наружных панелей).

2. Пламенное горение длительностью 10 с и более при наличии элементов систем утепления, навесных наружных панелей, расположенных на фасаде.

3. Пламенное горение длительностью 10 с и более источника пожарной нагрузки¹⁸ на вышележащем этаже.

4. Достижение критической температуры в локальной зоне¹⁹ расположения источника пожарной нагрузки – температуры, превышающей температуру до начала испытания в среднем более чем на 140 °С или локально более чем на 180 °С.

Регистрируемые параметры. В ходе проведения испытаний необходимо регистрировать следующие параметры:

– среднеобъемная и локальная температура внутри помещения, в котором происходит сжигание пожарной нагрузки (установку термоэлектрических преобразователей (далее – ТП) производить не менее чем в трех горизонтальных плоскостях на расстоянии (500 ± 20) мм, (1400 ± 20) мм, (2300 ± 20) мм от уровня пола. В каждой из этих плоскостей ТП рекомендуется устанавливать следующим образом: одну в центре плоскости; остальные равномерно по плоскости на расстоянии друг от друга не более 2 м, но не ближе 0,2 м от поверхности стен. При этом общее количество ТП в каждой плоскости должно быть не менее 5);

– среднеобъемная и локальная температура в локальной зоне расположения источника пожарной нагрузки внутри помещения, расположенного выше этажа пожара (установку ТП производить не менее чем в трех горизонтальных плоскостях на расстоянии (500 ± 20) мм, (1400 ± 20) мм, (2300 ± 20) мм от уровня пола и не более 2 м от проема в помещении);

– распределение температурных полей вдоль фасада здания (установку ТП производить рассредоточено вдоль междуэтажного пояса на расстоянии друг от друга не более 500 мм по высоте, не более 1000 мм по ширине и не менее 100 мм от стены);

– температура на обогреваемой и необогреваемой поверхности стеклопакета оконных проемов помещений этажа пожара и вышележащего этажа (установку ТП производить в центре плоскостей (прямоугольников), образованных путем деления (плоскости) оконного проема на три равных по высоте части);

– температура окружающей среды;

– направление и скорость ветра с четырех сторон здания в ходе испытаний;

¹⁸ Под источником понимается расположенная на вышележащем этаже вблизи проема горючая пожарная нагрузка в виде предметов декора и отделки помещений.

¹⁹ Под локальной зоной понимается зона на расстоянии не более 2 м относительно проема на вышележащем этаже относительно помещения пожара.

– параметры среды в зоне для ожидания (отстоя) людей (лоджии) (температура, оптическая плотность дыма, концентрации продуктов горения и кислорода, время и место появления пламени в ней) (установку ТП производить в количестве не менее двух в каждой плоскости на высоте (500 ± 20) мм, (1400 ± 20) мм, (2300 ± 20) мм от уровня пола посередине ширины лоджии, предусмотреть установку датчиков угарного газа, углекислого газа, кислорода, оптической плотности (лазер-приемник, люксметр) на высоте (500 ± 20) мм и (1700 ± 20) мм от уровня пола);

Помимо указанных параметров должны осуществляться:

– фотосъемка и видеозапись процесса горения внутри помещения с очагом пожара (с передней и боковой сторон фасада);

– фото- и тепловизионная съемка²⁰ параметров пламени (с передней и боковой стороны фасада), в том числе выходящего на фасад экспериментального фрагмента (с последующей оценкой его температуры и размеров, с учетом предварительно отмеченных маркеров по высоте и показаний тепловизора);

– фиксация времени разрушения каждого листа стеклопакетов фасада и иных условий протекания испытаний (на основе визуальных наблюдений);

– визуальная оценка поведения светопрозрачного фасада здания.

Измерительные приборы должны обеспечивать непрерывную запись или дискретную регистрацию параметров с интервалом не более 60 с (рекомендуемое значение – 15...30 с). Все измеряемые параметры с заданной дискретностью должны быть указаны в протоколе испытаний или приложениях к нему.

Приборы и оборудование, используемые для испытаний, должны обеспечивать назначенную точность измерения и регистрации фиксируемых параметров, прошедшие специальный контроль и поверку.

Проводить повторные испытания фрагмента допускается только после его восстановления до уровня, соответствующего технической документации. После отдельного испытания проводится оценка и делается вывод о возможности повторного проведения испытаний.

Заключение

1. Пожары в многоэтажных зданиях характеризуются их быстрым распространением по наружным ограждающим конструкциям (фасадам) как при использовании конструкций и/или систем утепления с горючим наполнителем, так и с негорючими материалами с распространением в вертикальном направлении через проемы или по светопрозрачным элементам. Для ограничения распространения пожара по фасаду зданий регламентируются огнестойкость и пожарная опасность изделий фасадов, а также их конструктивные решения. К ним относятся: устройство противопожарных штор, устройство междуэтажных поясов из негорючих материалов, устройство козырьков из негорючих материалов, расположение оконных проемов относительно друг друга, огнестойкость заполнений оконных проемов.

2. Анализ требований ТНПА и научной литературы по регламентируемым классификационным показателям, конструктивным решениям фасадов зданий, а также особенностям методик оценки их огнестойкости и пожарной опасности позволяют сделать вывод о необходимости комплексной и всесторонней экспериментальной оценки эффективности применяемых решений, влияющих на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи. Результаты такой оценки позволят оценить критерии безопасности рассматриваемых решений и усовершенствовать противопожарные требования, предъявляемые к фасадам зданий.

²⁰ При этом место установки тепловизора должно позволять контролировать всю необогреваемую поверхность фрагмента в соответствии с техническими характеристиками тепловизора. Для корректного измерения температуры тепловизором следует учитывать степень черноты поверхности.

3. Разработана методика проведения испытаний по оценке влияния конструктивных решений фасадов зданий на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи. Сформулированы общие положения, цель и задачи методики испытаний. Классифицированы испытания, проводимые на испытательном стенде, представляющем собой фрагмент трехэтажного здания. Определены расчетные сценарии пожара (время огневого воздействия, место расположения, вид и количество пожарной нагрузки, источник зажигания пожара). Установлены перечень необходимых для измерения (оценки) в ходе испытаний параметров, а также критерии достижения предельного состояния по пожароустойчивости конструктивных решений фасадов, при котором не обеспечивается ограничение пожара по фасаду в вертикальном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасанов, И.Р. Тепловые воздействия на наружные конструкции при пожаре / И.Р. Хасанов // Пожарная безопасность. – 2013. – № 4. – С. 16–26. – EDN: RPZWZZ.
2. Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current: Report of the Building Research Institute / The Building Research Institute, Ministry of Construction; S. Yokoi. – Tokyo, 1960. – 137 p. – No. 34.
3. Безбородов, В.И. Устойчивость при пожаре фасадных светопрозрачных конструкций высотных жилых зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Безбородов Владимир Игоревич; Академия государственной противопожарной службы МЧС России. – Москва, 2019. – 161 л.
4. Keski-Rahkonen, O. Breaking of Window Glass Close to Fire / O. Keski-Rahkonen // Fire and Materials. – 1988. – Vol. 12. – P. 61–69. – DOI: 10.1002/fam.810120204.
5. Pagni, P.J. Glass Breaking in Fires / P.J. Pagni, A.A. Joshi // Proc. of 3rd Int. Science Symp. «Fire Safety Science», London, Elsevier Applied Science. – 1991. – P. 791–802. – DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-791.
6. Святкин, Г.К. Расчетная модель разрушения остекления при тепловом воздействии пожара / Г.К. Святкин // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – № 4. – С. 54–57.
7. Святкин, Г.К. Расчетная модель разрушения остекления в виде тонкой свободной пластины при тепловом воздействии пожара / Г.К. Святкин // Пожаровзрывобезопасность. – 1994. – № 4. – С. 76–77.
8. Дудунов, А.В. Пожароустойчивость светопрозрачного заполнения оконных строительных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Дудунов Андрей Владимирович; Академия государственной противопожарной службы МЧС России. – Москва, 2010. – 128 л.
9. Window Breakage Induced by Exterior Fires: Report of the Building and Fire Research Laboratory of the NIST / United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology; F.W. Mowrer. – Gaithersburg, MD, 1998. – 48 p. – No. NIST-GCR-98-751.

Методология оценки влияния конструктивных решений фасадов зданий на распространение пожара по наружным ограждающим конструкциям на вышележащие этажи

Methodology for assessing the impact of building facade design on fire propagation through exterior envelopes to overlying floors

Ботян Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, начальник кафедры
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, Беларусь, г. Минск
Email: aseckis@mail.ru
SPIN-код: 5948-1623

Sergey S. Botyan

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Head of the Chair
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Belarus, Minsk
Email: aseckis@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8593-4413

Нехань Денис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, доцент
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, Беларусь, г. Минск
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», Chair of Fire Safety, Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Belarus, Minsk
Email: denis_nechany@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7838-4663

Полевода Иван Иванович

доктор технических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», начальник университета
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: ip@ucp.by
SPIN-код: 1662-9457

Ivan I. Palevoda

Grand PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Head of University
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: ip@ucp.by
ORCID: 0000-0003-2469-3553

Шатило Эдуард Эдуардович

Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие «Стройтехнорм», заместитель генерального директора по оценке соответствия
Адрес: ул. Кропоткина, 89, 220002, г. Минск, Беларусь
Email: shatilo@stn.by

Eduard E. Shatilo

Scientific Designing-Manufacturing Republican Unitary Enterprise «STROYTEKH NORM», Deputy Director General for Conformity Assessment
Address: Kropotkina str., 89, 220002, Minsk, Belarus
Email: shatilo@stn.by

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE IMPACT OF BUILDING FACADE DESIGN ON FIRE PROPAGATION THROUGH EXTERIOR ENVELOPES TO OVERLYING FLOORS

Botyan S.S., Nekhan' D.S., Palevoda I.I., Shatilo E.E.

Purpose. On the basis of theoretical and experimental studies to develop a test methodology for assessing the impact of structural solutions of building facades on the spread of fire through the exterior envelope to the overlying floors.

Methods. Review, analysis and comparison of the results of experimental and theoretical studies conducted in the field of fire propagation through the exterior envelope of buildings and structures.

Findings. A review of scientific and regulatory literature on the design of facade structural solutions that affect the spread of fire to the overlying floors, as well as the features of methods for assessing their fire resistance and fire hazard has been carried out. Classification indicators of structural solutions affecting the fire spread on the facades of buildings were determined. On the basis of the obtained data the methodology of testing to assess the impact of structural solutions of building facades on the spread of fire through the exterior envelope structures on the overlying floors is developed. The general provisions, purpose and objectives of the test methodology are formulated. The parameters of the building test fragments are determined. Estimated fire scenarios (time of fire impact, location of the hearth, type and quantity of fire load, ignition source) are determined. The parameters influencing the fire dynamics were evaluated and the parameters to be recorded during the tests were determined, as well as the criteria for reaching the limit state of fire resistance of facade structural solutions.

Application field of research. Development and improvement of building code requirements. Design and construction of multi-storey and high-rise buildings.

Keywords: structural solutions, facade, methodology, fire tests, fire, fire hazard, fire resistance.

(The date of submitting: January 14, 2025)

REFERENCES

1. Khasanov I.R. Teplovye vozdeystviya na naruzhnye konstruksii pri pozhare [Heat effects on external designs at a fire]. *Fire Safety*, 2013. No 4. Pp. 16–26. (rus). EDN: RPZWZZ.
2. Yokoi S. Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current: Report of the Building Research Institute. The Building Research Institute, Ministry of Construction. Tokyo, 1960. 137 p. No. 34.
3. Bezborodov V.I. *Ustoychivost' pri pozhare fasadnykh svetoprozrachnykh konstruksiy vysotnykh zhilykh zdaniy* [Fire stability of facade translucent structures of high-rise residential buildings]. PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow, 2019. 161 p. (rus)
4. Keski-Rahkonen O. Breaking of Window Glass Close to Fire. *Fire and Materials*, 1988. Vol. 12. Pp. 61–69. DOI:10.1002/fam.810120204.
5. Pagni P.J., Joshi A.A. Glass Breaking in Fires. *Proc. of 3rd Int. Science Symp. «Fire Safety Science», Elsevier Applied Science*. London, 1991. Pp. 791–802. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.3-791.
6. Svyatkin G.K. Raschetnaya model' razrusheniya ostekleniya pri teplovom vozdeystvii pozhara [Calculation model of glazing destruction under the thermal effect of fire]. *Fire and Explosion Safety*, 1993. No. 4. Pp. 54–57. (rus)
7. Svyatkin G.K. Raschetnaya model' razrusheniya ostekleniya v vide tonkoy svobodnoy plastiny pri teplovom vozdeystvii pozhara [Calculation model of the glazing destruction in the form of a thin free plate under the thermal effect of a fire]. *Fire and Explosion Safety*, 1994. No. 4. Pp. 76–77. (rus)
8. Dudunov A.V. *Pozharoustoychivost' svetoprozrachnogo zapolneniya okonnykh stroitel'nykh konstruksiy* [Fire resistance of the translucent filling of the window building structures]. PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow, 2010. 128 p. (rus)
9. Mowrer F.W. *Window Breakage Induced by Exterior Fires*: Report of the Building and Fire Research Laboratory of the NIST No. NIST-GCR-98-751. United States Department of Commerce Technology Administration, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD, 1998. 48 p.

Copyright © 2025 Botyan S.S., Nekhan' D.S., Palevoda I.I., Shatilo E.E.

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

ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ КРАТНОСТИ, ДИСПЕРСНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕН НИЗКОЙ КРАТНОСТИ

Камлюк А.Н.

Цель. Теоретически оценить влияние основных факторов, влияющих на кратность, дисперсность и устойчивость воздушно-механической пены, получаемой в устройствах для пожаротушения.

Методы. В процессе исследований применялись теоретические и эмпирические методы анализа.

Результаты. В результате анализа теоретических и экспериментальных данных по исследованию пен выявлены основные факторы, влияющие на численные значения их кратности, дисперсности и устойчивости. Установлено, что кратность, дисперсность и устойчивость таких пен существенно зависят от способа генерирования, геометрических характеристик устройств, скорости подаваемого раствора пенообразователя и его физико-механических свойств.

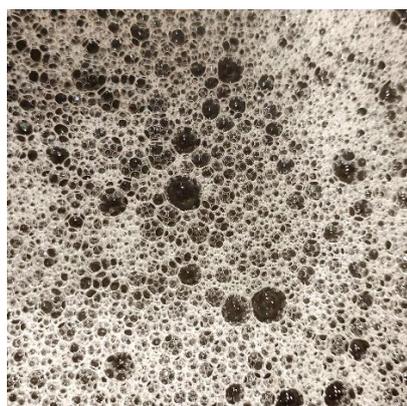
Область применения исследований. Результаты анализа могут быть применены при разработке пеногенерирующих устройств, а также для определения оптимальных режимов их работы.

Ключевые слова: пена, кратность, устойчивость, дисперсность, средний диаметр пузырька, газосодержание, капиллярное число, показатель смачивающей способности.

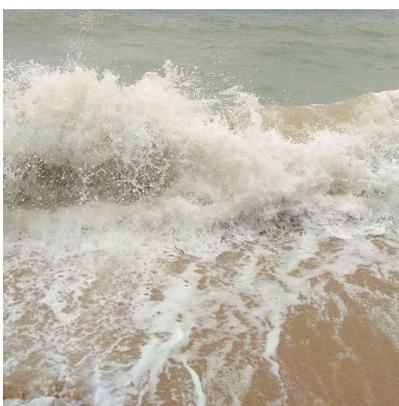
(Поступила в редакцию 13 января 2025 г.)

Введение

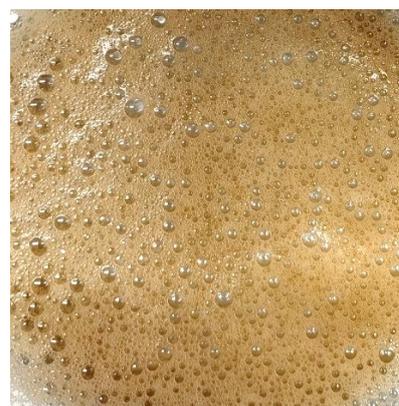
Люди регулярно встречаются с воздушно-механическими пенами (далее – пена) в своей повседневной деятельности – это может быть пена моющего средства 1а, морская пена 1б или пена кваса 1в. Пена как технологическая среда используется для повышения отдачи подземных пластов в добыче нефти и газа, во флотационных процессах обогащения полезных ископаемых и концентрировании биомассы при производстве продуктов биосинтеза, при очистке сточных вод, в качестве защитного противопылевого средства при проведении подземных работ, для смягчения последствий воздействия ударных волн от взрывов, а также как средство пенного пожаротушения [1, с. 3]. По всем этим направлениям в настоящее время активно ведутся исследования [2–8].



а



б



в

Рисунок 1. – Пена низкой кратности в повседневной жизнедеятельности

Систематическое изучение физико-химических свойств пен и пенных пленок началось более 150 лет назад, базируясь на первых работах бельгийского ученого Ж. Плато о мыльных пленках. Несмотря на это, работы прикладного характера появились совсем недавно – книги с описанием основных характеристик, а также механизмов образования и разрушения пен –

Э. Манегольда (1963 г.), Я. Бикермана (1973 г.) и В.К. Тихомирова (1975 г.), что связано со сложностью математического описания указанных процессов.

К основным характеристикам пен относятся кратность, устойчивость и дисперсность (рис. 2). Под кратностью понимают отношение объема получаемой пены к объему водного раствора пенообразователя (далее – раствор), из которого она получена. В отношении устойчивости пен различают следующие ее показатели: устойчивость объема (время разрушения 25 % ее первоначального объема), устойчивость к синерезису (время выделения из пены 50 % жидкой фазы), структурная устойчивость (время изменения среднего диаметра пузырька на 25 % от исходной величины) и др. Что же касается дисперсности – это физическая величина, обратно пропорциональная среднему диаметру пузырьков.



Рисунок 2. – Основные характеристики пены

На кратность, устойчивость и дисперсность пен существенное влияние оказывают физико-механические свойства раствора, способ смешения фаз, конструкция пеногенерирующего устройства, а также способы пенообразования. Тем не менее все указанные характеристики пены связаны между собой и зависят в первую очередь от газосодержания, смачивающей способности раствора и капиллярных явлений (рис. 2). Под пеногенерирующими в данной работе понимают устройства, способные генерировать пену, независимо от конструктивных особенностей и способа подачи раствора и воздуха.

Какая характеристика является доминирующей, сказать сложно – все зависит от области применения пены. Например, как кратность пены влияет на эффективность пожаротушения [9] или как зависит вкус пива от структуры пены, в частности от ее дисперсности, стало понятно только недавно [10; 11]. В зависимости от области применения желаемые свойства пены могут меняться. Для одних случаев требуется устойчивая пена, например, для пожаротушения, а иногда требуется довольно нестабильная пена, например, для очистки жидкости от некоторых органических соединений.

Основная часть

Кратность. По численному значению кратности пены делят на пены низкой ($4 \leq K \leq 20$), средней ($20 < K \leq 200$) и высокой ($K > 200$) кратности. По возможности регулировать численное значение кратности различают пены с регулируемой и нерегулируемой кратностью.

К пенам с нерегулируемой кратностью можно отнести те пены, которые получают путем генерирования на сетке или твердой поверхности за счет взбивания струи раствора пенообразователя. В этих случаях численное значение кратности может быть определено через долю ϕ объема газа в пене следующим образом [1, с. 5]:

$$K = \frac{1}{1 - \phi}. \quad (1)$$

К пенам с регулируемой кратностью относятся те пены, пузырьки которых генерируются в среде раствора (барботирование) за счет пропускания через него воздуха преимущественно под давлением от какого-нибудь устройства, например, компрессора (в этом случае пена называется компрессионной) через отверстие в камере смешения. В этом случае [8, с. 163–164]

$$K = 1 + \frac{p_0 + p_{\text{н}}}{p_0} \cdot \frac{\phi}{1 - \phi}, \quad (2)$$

где p_0 – атмосферное давление, Па;

$p_{и}$ – избыточное давление на выходе из компрессора, Па.

Геометрическая форма пузырьков в пене зависит от соотношения объемов газа и жидкости в ней, т.е. от ее кратности, а также от степени полидисперсности и способа упаковки пузырьков. В соответствии с выражением (1) и с учетом границ значения кратности $4 \leq K \leq 20$ для низкократных пен диапазоном газосодержания будет $0,75 \leq \varphi \leq 0,95$. Для компрессионных пен, согласно уравнениям (2), учитывая, что $p_{и}$ должно быть не менее 100 кПа, получаем следующий диапазон газосодержания: $-0,6 \leq \varphi \leq 0,9$. При увеличении $p_{и}$ газосодержание уменьшается при постоянной кратности (рис. 3).

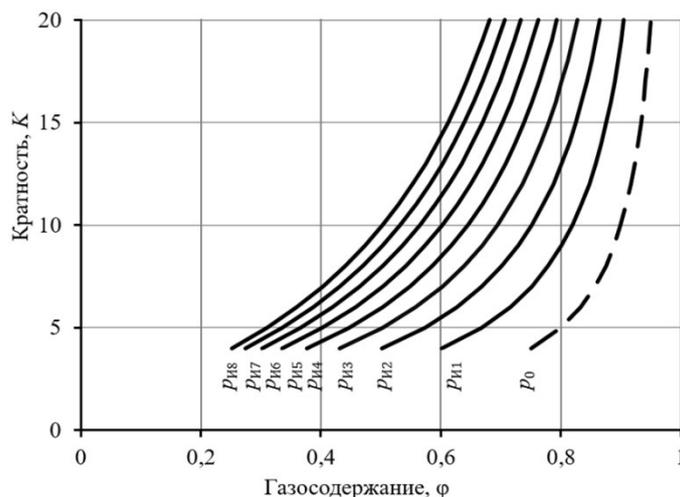


Рисунок 3. – Зависимости кратности K пены, полученной при атмосферном давлении p_0 , а также при различных избыточных давлениях $p_{иj} = j \cdot 100$ кПа ($j = 1, \dots, 8$), от газосодержания φ

В работах [12; 13] установлено, что для монодисперсных систем критерием полиэдричности можно считать условие $\varphi \geq 0,74$, причем для полидисперсных систем пузырьки газа могут сохранять сферическую форму и при $\varphi < 0,74$. Условие $\varphi \geq 0,74$ в соответствии с (1) характерно для кратности $K = 4$, что относится к пенам низкой кратности. С другой стороны, по (2) при $K = 4$ газосодержание в зависимости от избыточного давления может меняться от $\varphi = 0,75$ ($p_{и} = 0$ кПа) до $\varphi = 0,25$ ($p_{и8} = 800$ кПа), что в 3 раза меньше минимального газосодержания по (1) (рис. 3). При этом полиэдрическая структура компрессионных пен сохраняется при значительно низких значениях φ по сравнению с обычными пенами. Таким образом, избыточное давление оказывает существенное влияние на газосодержание, а следовательно, и на форму получаемых пузырьков пены.

Самый простой способ оценить кратность пены – использование формул (1) или (2). При этом не имеет значения, какой способ генерирования пены используется: выдувание пузырьков на сетке, барботирование раствора пенообразователя газом или взбивание струи на твердой поверхности. Однако генерировать пену с фиксированным значением газосодержания возможно только для случая барботирования раствора газом, например, при получении компрессионной пены [8, с. 163–164]. В любом другом случае газосодержание является неизвестным параметром, поэтому для расчета кратности необходимо использовать специальные регрессионные модели или иные эмпирические зависимости, которые включают критерии подобия [14].

Связь между кратностью пены со средним диаметром пузырька $d_{п}$ (м) установлена исходя из геометрических подходов и представляет собой следующее выражение:

– для шаровой пены [8, с. 46]

$$K = \frac{d_{п}}{3\delta}, \quad (3)$$

– для полиэдрической пены [15]

$$K = \frac{0,76d_n^2}{r_k^2}, \quad (4)$$

где δ – толщина пленки пузырька, м;

r_k – радиус кривизны поперечного сечения поверхности канала Плато – Гиббса, м.

Таким образом, кратность пены может быть выражена через средний диаметр пузырька по формулам (3) или (4).

Дисперсность. По дисперсности различают пены монодисперсные и полидисперсные. Первые можно получить лишь в особых случаях, используя специальные устройства, поэтому в реальных условиях пены оказываются всегда полидисперсными. По форме пузырьков различают шаровую, ячеистую (пузырьки имеют форму смятых шариков) и полиэдрическую (пузырьки имеют форму многогранников).

Численные значения среднего диаметра пузырьков пены зависят от способа ее получения. Поэтому сначала будет проанализирован случай, когда генерируется пена путем барботирования раствора пенообразователя газом (компрессионная пена), для которого рассчитать средний диаметр пузырька согласно [16] можно по следующей формуле:

$$d_n = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4B_1}{\sqrt{Q}}} - Q + \sqrt{Q} \right) \quad \text{при} \quad Q = \sqrt[3]{2B_1^2 + 2\sqrt{2A_1^3 + B_1^4}} + \sqrt[3]{2B_1^2 - 2\sqrt{2A_1^3 + B_1^4}}, \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{3\eta v a^2}{(\rho_1 - \rho)g}, \quad B_1 = \frac{3\sigma a}{(\rho_1 - \rho)g},$$

где η – коэффициент динамической вязкости раствора пенообразователя, Па·с;

v – скорость потока газа, м/с;

a – геометрический размер (диаметр трубки, по которой подается газ), м;

ρ_1 – плотность раствора пенообразователя, кг/м³;

ρ – плотность газа, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Для численной оценки и анализа параметров, влияющих на значение среднего диаметра пузырька, необходимо задаться внешними условиями, физико-механическими характеристиками раствора: атмосферное давление $p_0 = 101,325$ кПа, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с², плотность раствора $\rho_1 = 1040$ кг/м³, плотность газа $\rho = 1,3$ кг/м³, поверхностное натяжение раствора $\sigma = 0,024$ Н/м, динамическая вязкость раствора $\eta = 10^{-3}$ Па·с, геометрический параметр (диаметр трубки для подачи газа) $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м. Указанные параметры задаются по умолчанию, если при построении графиков не указано иное.

На рисунке 4а показана зависимость среднего диаметра пузырька пены от плотности газа. Как оказалось, плотность газа не влияет на диаметр пузырька, т.е. не важно, подается гелий $\rho = 0,179$ кг/м³, воздух $\rho = 1,293$ кг/м³, углекислый газ $\rho = 1,976$ кг/м³ или ксенон $\rho = 5,89$ кг/м³, – диаметр пузырька будет такой же. С повышением скорости подачи газа наблюдается увеличение диаметра пузырька: при переходе от $v = 1$ м/с (кривая 1) до $v = 50$ м/с (кривая 3) диаметр растет на 31 %. Более наглядно зависимость среднего диаметра пузырька от скорости видна на рисунке 4б. Так, при малых значениях диаметра трубки, когда a менее 1 мм, например, $a = 1$ мм (кривая 1, рис. 4б), влияние скорости на значение среднего диаметра пузырька незначительно. Однако при a более 1 мм значение среднего диаметра пузырька начинает увеличиваться с ростом значений скорости подачи газа. Уже при $a = 10$ мм (кривая 3, рис. 4б) значение среднего диаметра пузырька растет на 39 % при изменении скорости подачи газа от 1 до 50 м/с. Существенное влияние на средний диаметр пузырька оказывает поверхностное натяжение (рис. 4в), причем чем меньше скорость подачи газа, тем

больше указанная зависимость. Как показано на рисунке 4в (кривая 1), при изменении поверхностного натяжения с 0,005 до 0,05 Н/м диаметр пузырька увеличивается примерно на 60 % от первоначального значения.

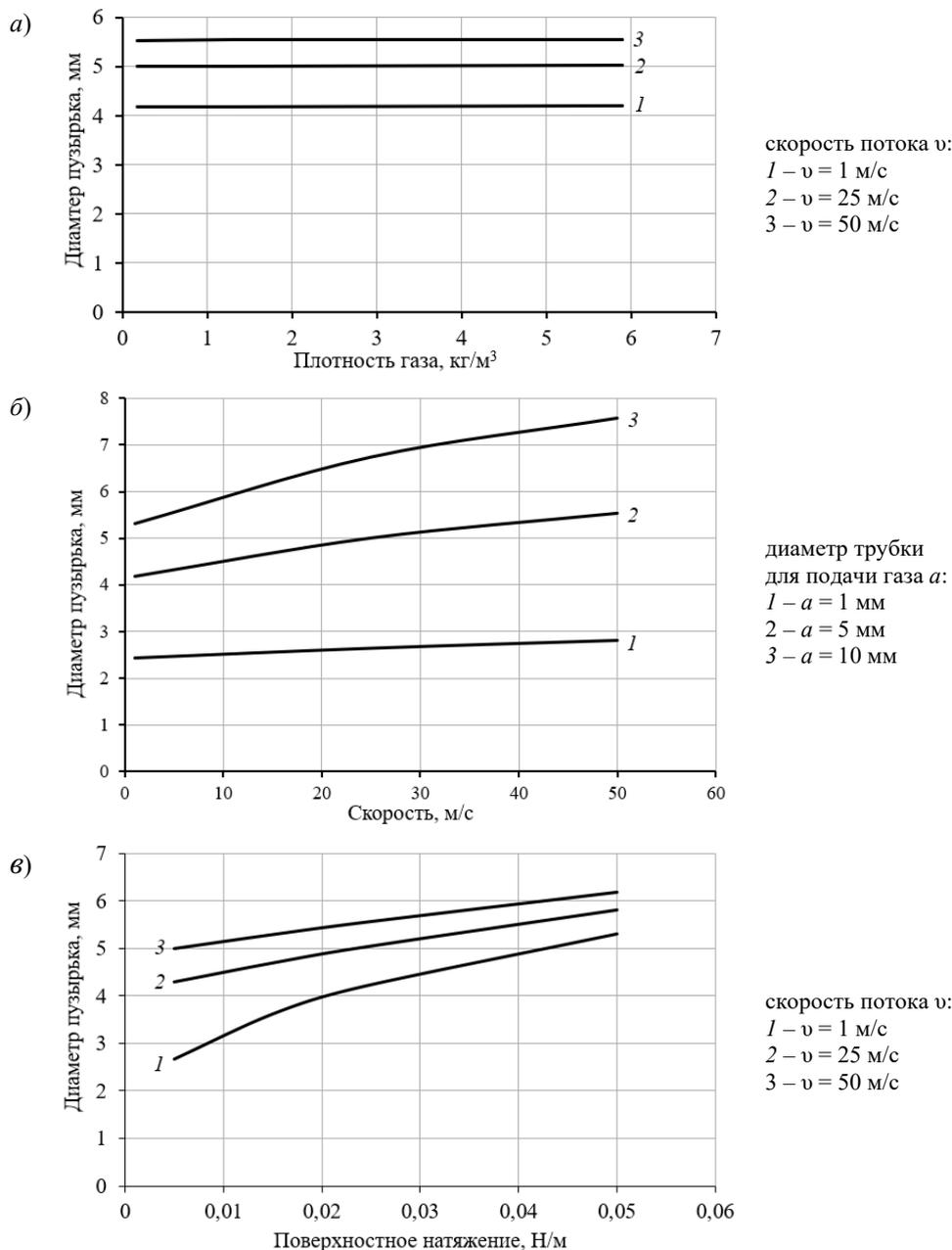


Рисунок 4. – Зависимости среднего диаметра пузырька от плотности газа (а), скорости потока (б) и поверхностного натяжения (в) раствора пенообразователя на затопленном отверстии

После рассмотрения случая с барботированием раствора пенообразователя газом можно исследовать еще два случая генерирования пены: на сетке и твердой поверхности. Экспериментально было зафиксировано, что скорость подачи раствора на рабочий орган (сетку или поверхность розетки оросителя) пеногенерирующего устройства оказывает существенное влияние на процесс пенообразования при прочих равных условиях. Так, в случае небольших скоростей вместо пены получается пеноэмульсия, а при достижении скорости некоторого критического значения происходит срыв процесса и, как итог, снова получается пеноэмульсия [17]. Таким образом, процесс пенообразования может протекать только в ограниченном диапазоне скоростей подачи раствора и газа на рабочий орган пеногенерирующего устройства, поэтому его важно знать.

Для случая генерирования пены на сетке значения среднего диаметра пузырька можно оценить по формуле [16]:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{D_1}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{\frac{D_1}{2} - \sqrt{Q}}. \quad (6)$$

В уравнении (6) принято обозначение:

$$Q = -\frac{C_1^3}{27} + \frac{D_1^2}{4}, \quad \text{где } C_1 = \frac{8a\sigma}{\rho v^2}, \quad D_1 = \frac{6a^2\eta}{\rho v}.$$

Вычисление диаметра пузырьков по формуле (6) может вызвать затруднения, если окажется, что величина $Q < 0$. В этом случае правая часть (6) представляет собой сумму кубических корней из сопряженных комплексных чисел с положительной действительной частью ($D_1/2 > 0$). Во избежание операций с комплексными числами, воспользовавшись формулой Муавра, из (6) получим следующее выражение для диаметра пузырьков:

$$d_n = 2 \cdot \sqrt[6]{\frac{D_1^2}{4} + |Q|} \cdot \cos\left(\frac{1}{3} \arctg \frac{2\sqrt{|Q|}}{D_1}\right), \quad \text{если } Q < 0. \quad (6')$$

Графические зависимости, построенные по выражению (6), изображены на рисунке 5.

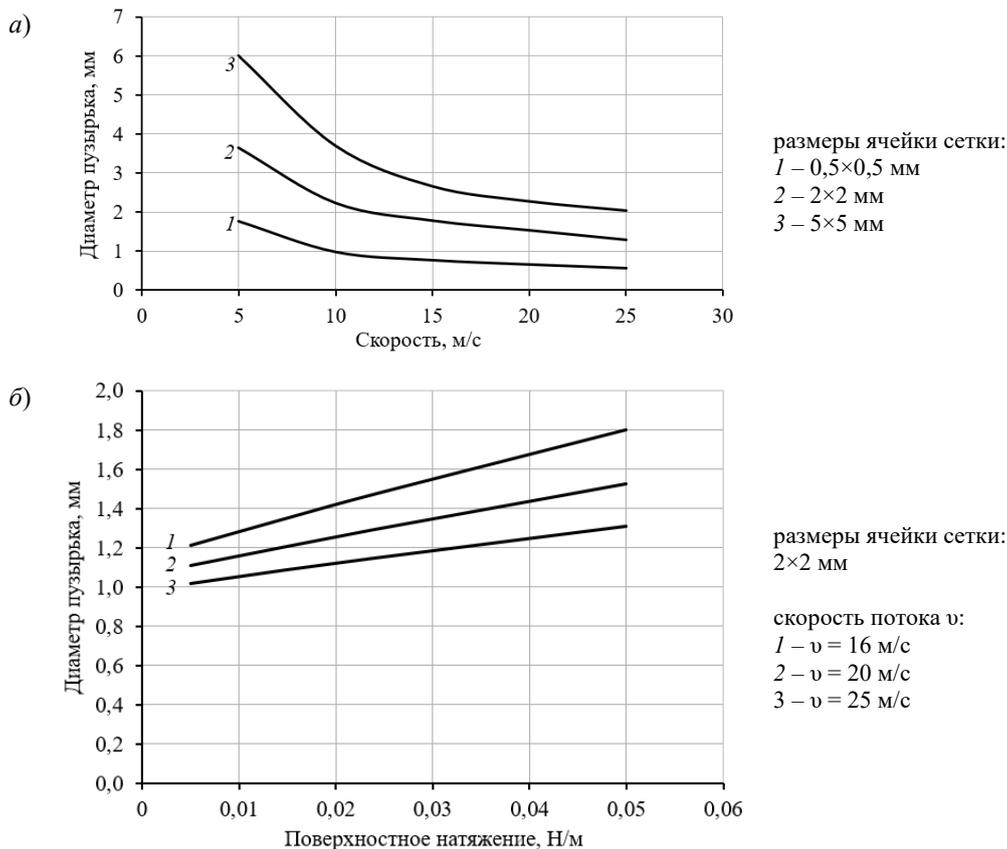


Рисунок 5. – Зависимости среднего диаметра пузырька от скорости потока (а) и поверхностного натяжения (б) раствора пенообразователя на незатопленном отверстии

В отличие от предыдущего случая (барботажа) существует минимальная скорость выдувания, ниже которой процесс пенообразования не будет протекать. Данная скорость зависит в первую очередь от геометрических размеров ячеек сетки: чем меньше размер ячейки сетки, тем больше должна быть скорость выдувания пузырьков. Экспериментально данный факт фиксировался многими исследователями, например, в работе [18]. Кроме того, средний диаметр

с ростом скорости стремительно уменьшается, например, для ячеек сетки 5×5 мм с 4,1 мм при $v = 8$ м/с до 2 мм при $v = 25$ м/с (на 50 %), что также хорошо согласуется с экспериментальными данными [19], по которым можно судить о наличии максимальной скорости, при которой будет сохраняться процесс пенообразования, но при превышении которой вместо пены пойдет пеноэмульсия, т.е. произойдет срыв процесса пенообразования на сетке.

На значение этой скорости оказывает влияние поверхностное натяжение раствора пенообразователя: чем меньше поверхностное натяжение, тем меньше значение максимальной скорости. Для подтверждения данного факта на рисунке 5б построены зависимости среднего диаметра пузырька от поверхностного натяжения для скоростей подачи 16, 20 и 25 м/с. В экспериментальной работе [20] были получены значения средних диаметров пузырьков на сетке, которые хорошо согласуются с результатами настоящей работы.

Для случая образования пены путем взбивания струи раствора пенообразователя о твердую поверхность средний диаметр пузырька согласно [17] можно определить следующим образом:

$$d_{\text{п}} = \frac{4\sigma}{2\rho_1 v^2 - p_0}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7) и рисунка 6, скорость подачи раствора пенообразователя на твердую поверхность, где происходит дезинтеграция, имеет определяющее значения для среднего диаметра пузырька. При этом диапазон скоростей, при котором будет проходить пенообразование, так же как и в предыдущем случае, лежит в узком диапазоне. В отличие от выдувания пены на сетке средний диаметр пузырьков уменьшается намного быстрее: при повышении скорости всего на 7 % средний диаметр становится меньше сразу на 91 %.

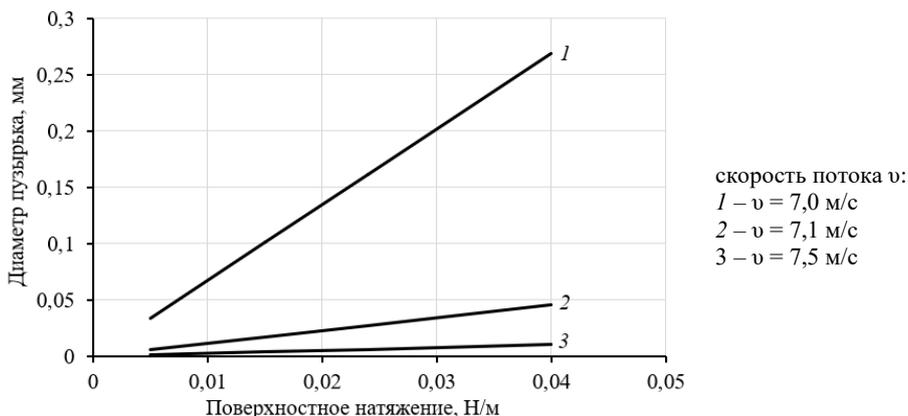


Рисунок 6. – Зависимость среднего диаметра пузырька от поверхностного натяжения раствора пенообразователя на поверхности

Устойчивость. По устойчивости пен наибольший интерес представляет время разрушения 25 % объема пены и время, в течение которого из пены вытечет 50 % жидкой фазы. В ходе проведения многочисленных экспериментов с различными устройствами для генерирования пен, марками пенообразователей, скоростями подачи растворов и газа было установлено, что эти времена примерно равны (отклонение не превышает 20 %).

Для расчета времени вытекания жидкой фазы из пенной структуры можно воспользоваться выражением [21, с. 45]:

$$t = \left(\frac{V_0}{V_0 - V_t} - 1 \right) \frac{3r_{\text{к}}^2 r_{\text{сп}} \eta}{4\delta^2}, \quad (8)$$

где V_0 – объем жидкости в пене в момент времени $t = 0$, м³;

V_t – объем жидкости в пене в момент времени t , м³;

$r_{\text{сп}} = d_{\text{п}} / 2$.

При потере 50 % жидкой фазы выражение (8) преобразовывается в формулу:

$$C = \frac{9r_k^2 d_n \eta}{8\delta^2}, \quad (9)$$

где C – устойчивость (время, за которое пена потеряет 50 % жидкой фазы), с.

В уравнении (9) присутствует средний диаметр пузырька, который зависит от способа генерирования пены и может быть получен по формулам (5)–(7) или по упрощенным выражениям (3), (4), для которых важно знать форму пузырьков пены. В формуле (9) есть еще такие параметры, как толщина пленки и радиус кривизны канала Плато – Гиббса, возведенные во вторую степень каждый, которые являются функциями того же времени и для фиксации которых необходимо точное оборудование.

В работе [22] получена другая зависимость для определения устойчивости:

$$C = \frac{\tau\sigma K}{\rho_1 v} = \frac{\tau K}{C_a}, \quad (10)$$

где τ – показатель смачивающей способности раствора пенообразователя, с;

C_a – капиллярное число.

В выражение (10) входят параметры, которые можно определить в лабораторных условиях и которые для их расчета не требуют дорогого оборудования. Полученное соотношение (10) хорошо описывает экспериментальные данные, полученные при испытаниях пенообразователей, используемых в пожаротушении [22].

Для проверки универсальности указанного выражения и возможности применения его в других сферах были проведены эксперименты с гелем для мытья посуды. Предварительно в лаборатории были получены все необходимые для расчета физико-химические параметры раствора: $\rho_1 = 1003,2 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\sigma = 28,18 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2$, $\tau = 4,8 \text{ с}$. В ходе проведения экспериментов были установлены значения кратности и устойчивости получаемой пены: $K_{\text{эксп}} = 7,55$; $C_{\text{эксп}} = 102 \text{ с}$ соответственно. Расчетное значение устойчивости по формуле (10) $C_{\text{теор}} = 100,1 \text{ с}$ на 1,9 % отличается от экспериментального значения, что свидетельствует о возможности применения ее не только при расчетах в пожаротушении, но и в других отраслях деятельности человека.

Заключение

В результате анализа теоретических и экспериментальных данных по исследованию пен выявлены основные факторы, влияющие на численные значения их кратности, дисперсности и устойчивости. Установлено, что кратность, дисперсность и устойчивость таких пен существенно зависят от способа генерирования, геометрических характеристик устройств, скорости подаваемого раствора пенообразователя и его физико-механических свойств, скорости газового потока. Для оценки их численных значений можно пользоваться формулами, представленными в работе. В то же время плотность газового потока не влияет на перечисленные характеристики пены, в связи с чем ею можно пренебрегать при проведении расчетов: $\rho_1 - \rho = \rho_1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветошкин, А.Г. Физические основы и техника процессов сепарации пены: научн. изд. / А.Г. Ветошкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 404 с. – ISBN: 978-5-9729-0111-1.
2. Hill, C. Foams: From nature to industry / C. Hill, J. Eastoe // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2017. – Vol. 247. – P. 496–513. – DOI: 10.1016/j.cis.2017.05.013.
3. Nanoparticle foam flotation for caesium decontamination using a pH-sensitive surfactant / C. Micheau, D. Dedovets, P. Bauduin [et al.] // *Environmental science: Nano.* – 2019. – Vol. 6, № 5. – P. 1576–1584. – DOI: 10.1039/c9en00188c.

4. Murray, B.S. Recent developments in food foams / B.S. Murray // *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. – 2020. – Vol. 50. – Article 101394. – 24 p. – DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101394.
5. The Acoustics of Liquid Foams / F. Elias, J. Crassous, C. Derec [et al.] // *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. – 2020. – Vol. 50. – Article 101391. – 13 p. – DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101391.
6. A Review on Foam Stabilizers for Enhanced Oil Recovery / T. Majeed, M.S. Kamal, X. Zhou, T. Solling // *Energy & Fuels*. – 2021. – Vol. 35, № 7. – P. 5594–5612. – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00035.
7. Leaching Foams for Copper and Silver Dissolution: A Proof of Concept of a More Environmentally Friendly Process for the Recovery of Critical Metals / P. Trinh, A. Mikhailovskaya, M. Zhang [et al.] // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2021. – Vol. 9, № 42. – P. 14022–14028. – DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c02258.
8. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 224 с. – ISBN: 978-985-590-050-5.
9. Kamluk, A.N. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov, A.V. Grachulin // *Fire Safety Journal*. – 2020. – Vol. 116. – Article 103177. – 10 p. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103177.
10. Benilov, E.S. Why do bubbles in Guinness sink? / E.S. Benilov, C.P. Cummins, W.T. Lee // *American Journal of Physics*. – 2013. – Vol. 81, № 2. – P. 88–91. – DOI: 10.1119/1.4769377.
11. Liger-Belair, G. How Many CO₂ Bubbles in a Glass of Beer? / G. Liger-Belair, C. Cilindre // *ACS Omega*. – 2021. – Vol. 6, № 14. – P. 9672–9679. – DOI: 10.1021/acsomega.1c00256.
12. Мухамедиев, Ш.А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость 1 / Ш.А. Мухамедиев, В.А. Васькина // *Масла и жиры*. – 2008. – № 10. – С. 22–26.
13. Мухамедиев, Ш.А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость 2 / Ш.А. Мухамедиев, В.А. Васькина // *Масла и жиры*. – 2008. – № 11. – С. 2–5.
14. 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*. – 2024. – Vol. 17 (7). – Article 13102. – 11 p. – DOI: 10.34910/MCE.131.2.
15. Кротов, В.В. Теория синерезиса пен и концентрированных эмульсий. 1. Локальная кратность полиэдрических дисперсных систем / В.В. Кротов // *Коллоидный журнал*. – 1980. – Т. 42, №6. – С. 1081–1091.
16. Чан, Д.Х. Оценка диаметра пузырьков и скорости потока пенообразующей смеси для их образования на сетке пеногенерирующих устройств / Д.Х. Чан, А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов [и др.] // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 84–94. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. – EDN: QAENWG.
17. 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.
18. Salkin, L. Generation soap bubbles by blowing on soap films / L. Salkin, A. Schmit, P. Panizza, L. Courbin // *Physical Review Letters*. – 2016. – Vol. 116, № 7. – Article 077801. – 5 p. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
19. Бычков, А.И. О срыве пенообразования на сетках / А.И. Бычков // *Материалы VII Всесоюзной науч.-практ. конф. «Горение и проблемы тушения пожаров»: Секция «Тепломассообмен в условиях пожара»*. – М.: ВНИИПО, 1981. – С. 17–20.
20. Камлюк, А.Н. Влияние размеров ячейки сетки и расстояния от сопла на дисперсность пены / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.Ф. Титовец [и др.] // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 441–450. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.441. – EDN: GNBQTD.
21. Канн, К.Б. Капиллярная гидродинамика пен / К.Б. Канн. – Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1989. – 167 с. – ISBN: 5-02-028655-9.
22. Камлюк, А.Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. – EDN: SQVQWY.

**Подходы к расчету кратности, дисперсности и устойчивости
воздушно-механических пен низкой кратности**

**Approaches to calculating the expansion, dispersion and stability
of low expansion air-mechanical foams**

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», заместитель
начальника университета по научной
и инновационной деятельности

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»,
Deputy Chief of the University
on Scientific and Innovative Activity

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

APPROACHES TO CALCULATING THE EXPANSION, DISPERSION AND STABILITY OF LOW EXPANSION AIR-MECHANICAL FOAMS

Kamlyuk A.N.

Purpose. To theoretically evaluate the influence of the main factors affecting the expansion rate, dispersion and stability of air-mechanical foam produced in fire extinguishing devices.

Methods. Theoretical and empirical methods of analysis were used in the research.

Findings. As a result of the analysis of theoretical and experimental data on foam research, the main factors affecting the numerical values of their expansion rate, dispersion and stability were identified. It was found that the expansion rate, dispersion and stability of such foams significantly depend on the generation method, geometric characteristics of the devices, the rate of the supplied foaming agent solution and its physical and mechanical properties.

Application field of research. The results of the analysis can be used in the development of foam-generating devices, as well as to determine the optimal modes of their operation.

Keywords: foam, expansion rate, stability, dispersion, average bubble diameter, gas content, capillary number, wetting capacity index.

(The date of submitting: January 13, 2025)

REFERENCES

1. Vetoshkin A.G. *Fizicheskie osnovy i tekhnika protsessov separatsii peny* [Physical basis and technique of foam separation processes]: scientific edition. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2016. 404 p. (rus). ISBN: 978-5-9729-0111-1.
2. Hill C., Eastoe J. Foams: From nature to industry. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017. Vol. 247. Pp. 496–513. DOI: 10.1016/j.cis.2017.05.013.
3. Micheau C., Dedovets D., Bauduin P., Diat O., Girard L. Nanoparticle foam flotation for caesium decontamination using a pH-sensitive surfactant. *Environmental science: Nano*, 2019. Vol. 6, No. 5. Pp. 1576–1584. DOI: 10.1039/c9en00188c.
4. Murray B.S. Recent developments in food foams. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2020. Vol. 50. Article 101394. 24 p. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101394.
5. Elias F., Crassous J., Derec C., Dollet B., Drenckhan W., Gay C., Leroy V., Noûs C., Pierre J., Saint-Jalmes A. The Acoustics of Liquid Foams. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2020. Vol. 50. Article 101391. 13 p. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.101391.
6. Majeed T., Kamal M.S., Zhou X., Solling T. A Review on Foam Stabilizers for Enhanced Oil Recovery. *Energy & Fuels*, 2021. Vol. 35, No. 7. Pp. 5594–5612. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c00035.
7. Trinh P., Mikhailovskaya A., Zhang M., Perrin P., Pantoustier N., Lefèvre G., Monteux C. Leaching Foams for Copper and Silver Dissolution: A Proof of Concept of a More Environmentally Friendly Process for the Recovery of Critical Metals. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021. Vol. 9, No. 42. Pp. 14022–14028. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c02258.
8. 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.
9. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers. *Fire Safety Journal*, 2020. Vol. 116. Article 103177. 10 p. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103177.
10. Benilov E.S., Cummins C.P., Lee W.T. Why do bubbles in Guinness sink? *American Journal of Physics*, 2013. Vol. 81, No. 2. Pp. 88–91. DOI: 10.1119/1.4769377.
11. Liger-Belair G., Cilindre C. How Many CO₂ Bubbles in a Glass of Beer? *ACS Omega*, 2021. Vol. 6, No. 14. Pp. 9672–9679. DOI: 10.1021/acsomega.1c00256.
12. Mukhamediev Sh.A., Vas'kina V.A. Emul'sii i peny: stroenie, poluchenie, ustoychivost' 1 [Emulsions and foams: structure, production, stability 1]. *Masla i zhiry*, 2008. No. 10, Pp. 22–26. (rus)
13. Mukhamediev Sh.A., Vas'kina V.A. Emul'sii i peny: stroenie, poluchenie, ustoychivost' 2 [Emulsions and foams: structure, production, stability 2]. *Masla i zhiry*, 2008. No. 11, Pp. 2–5. (rus)

14. 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 (7). Article 13102. 11 p. DOI: 10.34910/MCE.131.2.
15. Krotov V.V. Teoriya sinerezisa pen i kontsentriruyemykh emul'siy. 1. Lokal'naya kratnost' poliedricheskikh dispersnykh sistem [Syneresis theory of foams and concentrated emulsions. 1. Local multiplicity of polyhedral disperse systems]. *Colloid Journal*, 1980. Vol. 42, No. 6. Pp. 1081–1091. (rus)
16. Chan D.Kh., Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V., Platonov A.S., Titovets A.F. Otsenka diametra puzyr'kov i skorosti potoka penoobrazuyushchey smesi dlya ikh obrazovaniya na setke penogeneriruyushchikh ustroystv [Evaluation of the bubble's diameter and the blowing speed of the air-mechanical foam forming bubbles on the screen of the foam generators]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 1. Pp. 84–94. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. EDN: QAEHWG.
17. Kamlyuk A.N. Kolichestvennoe opisaniye mekhanizmov obrazovaniya vozdushno-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.
18. Salkin L., Schmit A., Panizza P., Courbin L. Generating soap bubbles by blowing on soap films. *Physical Review Letters*, 2016. Vol. 116, No. 7. Article 077801. 5 p. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
19. Bychkov A.I. O sryve penoobrazovaniya na setkakh [About foaming disruption on the nets]. *Proc. of VII All-Union scientific-practical conf. «Gorenie i problemy tusheniya pozharov»*: Section «Teplomassoobmen v usloviyakh pozhara». Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 1981. Pp. 17–20. (rus)
20. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Titovets A.F., Polochanin N.S., Grachulin A.V. Vliyanie razmerov yacheyki setki i rasstoyaniya ot sopla na dispersnost' peny [Influence of the dimensions of the grid cell and the distance from it to the nozzle of the foam-generating device on the foam dispersion]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 4. Pp. 441–450. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-4.441. EDN: GNBQTD.
21. Kann K.B. *Kapillyarnaya gidrodinamika peny* [Capillary hydrodynamics of foams]. Novosibirsk: Nauka, 1989. 167 p. (rus). ISBN: 5-02-028655-9.
22. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G. Zavisimost' ob'emnoy ustoychivosti nizkokratnykh peny ot ikh kratnosti [Dependence of the volume stability on the expansion rate of low-expansion foam]. *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.

Copyright © 2025 Kamlyuk A.N.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ РАЗРУШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕБУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Фомихина И.В., Бирюк В.А., Маркова Л.В.

Цель. Определение причин разрушения деталей нефтебурового оборудования из конструкционных сталей под действием эксплуатационных нагрузок.

Методы. Исследования выполнялись на аттестованном оборудовании аккредитованного органами Госстандарта Республики Беларусь Испытательного центра Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа.

Результаты. Проведены исследования элементного состава, морфологии излома, структуры, механических свойств, твердости деталей нефтебурового оборудования, разрушенных под действием эксплуатационных нагрузок. Установлены причины разрушения муфты обсадной трубы, шпильки, кольца замковой опоры и насосной штанги буровых установок, эксплуатируемых на крупнейших месторождениях ГПО «Белоруснефть».

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы в субъектах промышленной безопасности, эксплуатирующих потенциально опасные объекты, работающие в условиях действия эксплуатационных нагрузок различной интенсивности и типов нагружения с целью повышения уровня промышленной безопасности.

Ключевые слова: нефтебуровое оборудование, детали буровой установки, структура, свойства, твердость, морфология излома, разрушение, термообработка, промышленная безопасность.

(Поступила в редакцию 10 января 2025 г.)

Введение

В промышленных масштабах добыча нефти в Беларуси началась в 1965 г. Запасы углеводородов сосредоточены в районе Припятского прогиба (Гомельская и Могилевская области) – большая их часть относится к трудноизвлекаемым. С начала разработки добыто более 145 млн т нефти и свыше 16 млрд куб. м попутного нефтяного газа. Основной объем ресурсов нефтяники получили из крупнейших месторождений – Речицкого, Осташковичского, Южно-Осташковичского и Вишанского.

Общий фонд скважин – более тысячи единиц. Эксплуатационный фонд составляет около 800 скважин – 95 % из них работают с помощью электроцентробежных и штанговых глубинных насосов. Эксплуатацией скважин занимается Государственное производственное объединение «Белоруснефть» (НГДУ «Речицанефть»).

Максимальный годовой уровень нефтедобычи в Беларуси был зафиксирован в 1975 г. – 7,96 млн т. Так как основные месторождения вступили в заключительную стадию разработки, с 1976 г. добыча углеводородов начала снижаться. Показатель за 1997 г. – 1,82 млн т. Организация рациональной разработки залежей помогла стабилизировать ситуацию. С 2013 г. уровень добычи начал удерживаться на отметке 1645 тыс. т. С 2017-го – постепенный ежегодный прирост и в 2024 г. он достиг 1938 тыс. т.

Проходка нефтегазовых скважин производится с помощью специальной техники – бурового оборудования. Согласно ГОСТ Р 51365-2009 (ISO 10423:2003)¹ к деталям бурового оборудования относят отдельные части, используемые при сборке узлов оборудования,

¹ Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование для бурения и добычи. Оборудование устья скважины и фонтанное устьевое оборудование. Общие технические требования: ГОСТ Р 51365-2009 (ISO 10423:2003). – Взамен ГОСТ Р 51365-99; введ. 15.12.2009. – М.: Стандартинформ, 2011. – 58 с.

а также детали, нарушение функционирования которых приводит к вытеканию жидкости скважины в атмосферу.

В процессе эксплуатации нефтебуровое оборудование подвергается воздействию широкого спектра нагрузок, вследствие которых в структуре металла происходит накопление повреждений и их последующая трансформация в микротрещины. Нагрузки могут быть кратковременными (в том числе ударными), длительными и многократно прикладываемыми. Чрезмерные внешние нагрузки со временем становятся причиной разрушения оборудования. Под действием длительных нагрузок происходит медленная деформация объекта, постепенно ослабляющая его прочность. Длительная статическая нагрузка приводит к разрушению объекта даже в тех случаях, когда такая же кратковременная нагрузка для него не опасна [1–4]. Деформация металла при нагружении отражается изменением формы и размеров деталей. Эти изменения могут быть временными (упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки) и остаточными (пластические деформации, остающиеся после снятия нагрузки). Повреждение деталей выражается в виде изгибов, вмятин и скручиваний [4–6]. Дефекты структуры металла зарождаются и развиваются в зонах концентрации механических напряжений [3–8].

Усталостные трещины являются наиболее распространенными эксплуатационными дефектами. Основная причина усталостных разрушений деталей – действие высоких переменных напряжений. Усталостные изломы возникают при напряжениях ниже предела текучести. Процесс начинается с зарождения усталостной трещины, появлению которой способствует наличие концентратора напряжений в основном сечении детали. Возникнув, усталостная трещина под действием циклической нагрузки, распространяется вглубь детали, что приводит к ее разрушению [3–10].

Возникновение различных повреждений или неисправностей оборудования обусловлено конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами. К конструктивным факторам относятся: величина зазоров и натягов в сопряжениях сборочных единиц; материал деталей; величина расчетных нагрузок и характер их воздействия. Технологическими факторами являются: способы получения заготовок; технология обработки деталей (механическая, термическая и др.); точность обработки; соблюдение технологических процессов при изготовлении или ремонте деталей, проведении сборочных работ, испытаний и др. Эксплуатационные факторы определяются: режимами нагруженности оборудования; интенсивностью эксплуатации во времени; своевременным проведением регламентных работ; полнотой и качеством технического обслуживания и ремонта; квалификацией обслуживающего персонала; воздействием внешней среды и др. [8–10].

Основная часть

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны образцы деталей и узлов бурового оборудования, разрушившиеся в процессе эксплуатации при проходке скважин. В качестве таковых по обращению эксплуатирующей организации были выбраны муфта обсадной трубы Ø 140 мм и шпилька (Речицкое месторождение), кольцо замковой опоры (Вишанское месторождение) и насосная штанга НШ-19 (Давыдовское нефтяное месторождение).

Исследование элементного состава проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре ED 2000 фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания) и на атомно-эмиссионном спектрометре «ЭМАС-200ССД». Анализ на углерод выполнялся на экспресс-анализаторе АН 7529. Анализ на серу осуществлялся на экспресс-анализаторе АС 7932. Съемка общего вида разрушенных образцов и исследование морфологии излома проводились с помощью стереоскопического микроскопа «Альтами СМ0745». Размеры резьбы измерялись с помощью двухкоординатного измерительного микроскопа ДИП-1. Испытание на растяжение выполнялось на универсальной испытательной машине Tinius Olsen H150K-U (Англия)

согласно ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84)². Ударная вязкость определялась по ГОСТ 9454-78³ на маятниковом копре Tinius Olsen IT406 с максимальной энергией удара маятника 406 Дж. Исследование микроструктуры проводилось на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия). Твердость по Роквеллу определялась на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013-59⁴. Микротвердость измерялась на микротвердомере Micromet-II с нагрузкой 1 кг по ГОСТ 9450-76⁵. Перевод микротвердости в твердость по Роквеллу осуществлялся по таблицам ASTM. Погрешность перевода ± 3 ед.

Исследование причин разрушения муфты трубы обсадной $\varnothing 140$ мм группы прочности Р110 Речицкого месторождения. Для установления причины разрушения было проведено определение соответствия элементного состава, размеров резьбы, механических свойств, твердости, микроструктуры требованиям ГОСТ Р 53366-2009⁶, сертификату № 32301954 ОА «Таганрогский металлургический завод» и API Spec 5 CT. Для выявления характера разрушения изучалась морфология излома. Оценка соответствия по требованиям заказчика проводилась по ГОСТ Р 53366-2009, т.к. трубы и комплектующие к ним были введены в эксплуатацию до 2017 г. (до отмены данного ГОСТ).

Общий вид и морфология поверхности фрагментов резьбового соединения разрушенной муфты представлены на рисунке 1. Из рисунка видно, что разрушение произошло на участке резьбы. В представленных фрагментах разрушенного резьбового соединения муфты наблюдаются смятые, вытянутые и сильно деформированные витки. Присутствуют трещины, на внутренней поверхности имеются затертости.

Элементный состав образца муфты следующий: С – 0,25 %, S – 0,0072 %, Mn – 0,86 %, Cr – 0,78 %, Si – 0,27 %, Mo – 0,21 %, Cu – 0,21 %, Ni – 0,07 %, P – 0,014 %, Fe – основа.

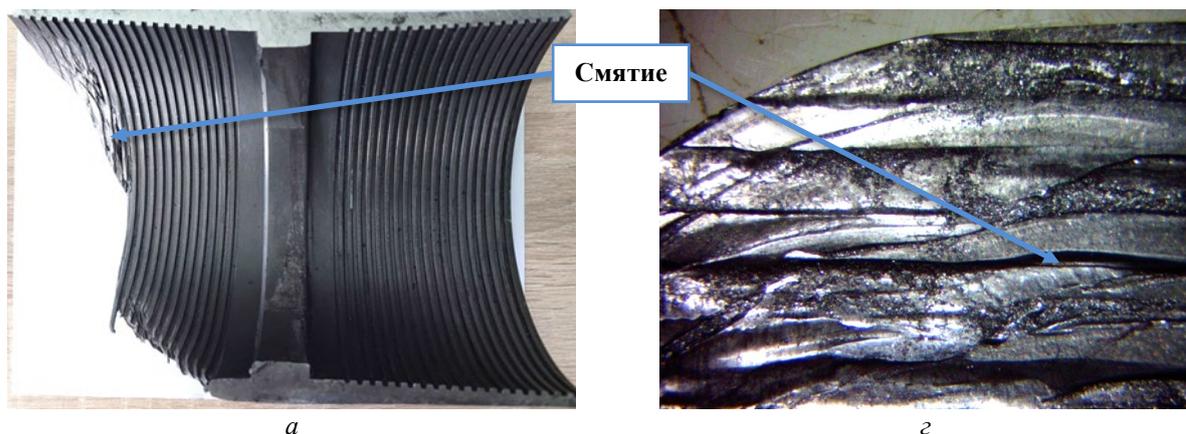


Рисунок 1. – Общий вид (а-в) и морфология поверхности (z-e) фрагментов резьбового соединения разрушенной муфты

² Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). – Взамен ГОСТ 1497-73; введ. 16.07.1984. – М.: Стандартинформ, 2008. – 24 с.

³ Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах: ГОСТ 9454-78. – Введ. 01.01.1979. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 12 с.

⁴ Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу: ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). – Введ. 01.01.1960. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 10 с.

⁵ Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: ГОСТ 9450-76. – Введ. 01.01.1977. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 35 с.

⁶ Трубы стальные, применяемые в качестве обсадных или насосно-компрессорных труб для скважин в нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия: ГОСТ Р 53366-2009 (ИСО 11960:2004). – Действ. до 01.07.2018; введ. 01.03.2010. – М.: Стандартинформ, 2010. – 202 с.

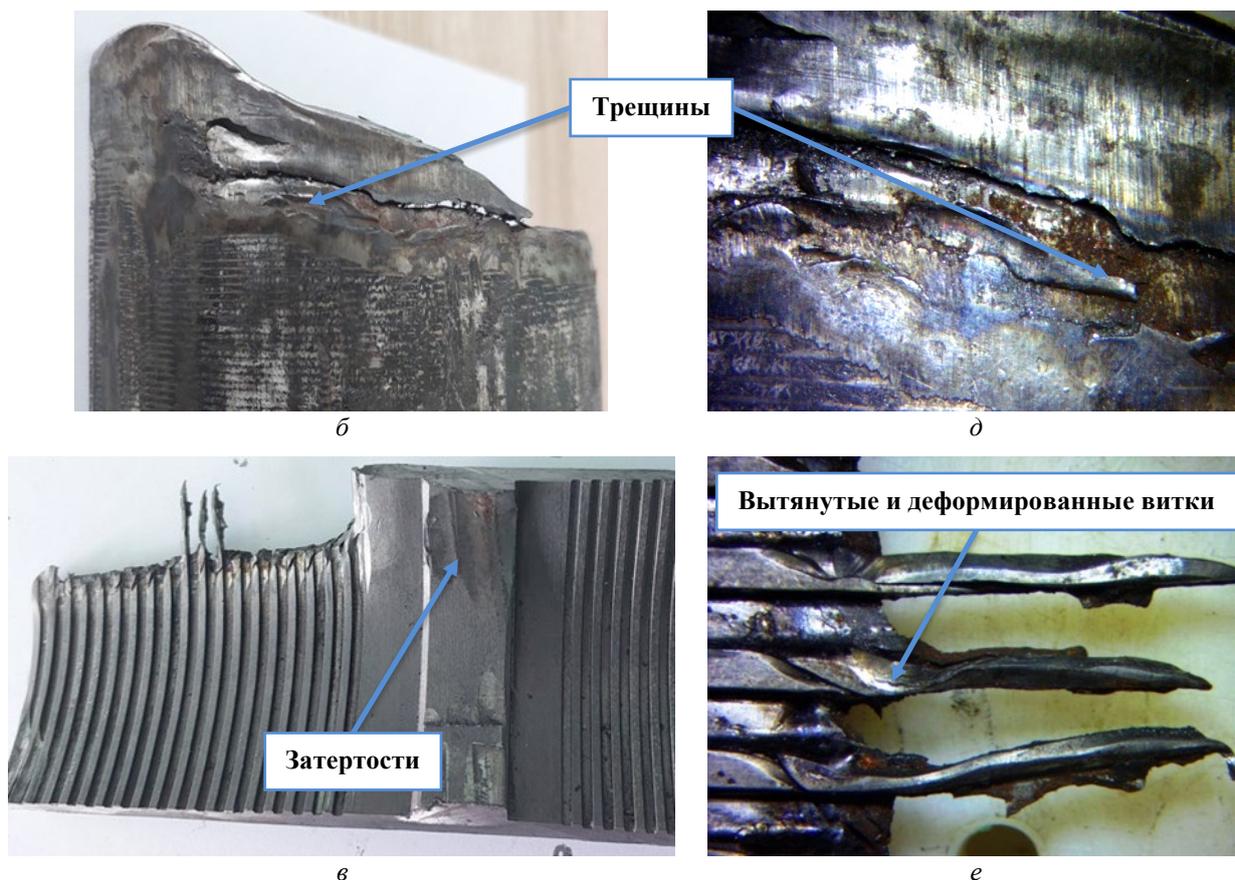


Рисунок 1. – Общий вид (а–в) и морфология поверхности (г–е) фрагментов резьбового соединения разрушенной муфты

В результате исследований установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений ближайшим отечественным аналогом материала образца является сталь марки 25ХГМ (ГОСТ 4543-2016⁷), но отличается более низким содержанием хрома (по ГОСТ Сг должно быть 0,9–1,2 %). Для группы прочности Р110 по API Spec 5 СТ в составе металла труб регламентируются содержание фосфора и серы в количествах до 0,030 %.

Исходя из полученных результатов элементного состава, можно сделать вывод, что по содержанию фосфора и серы образец муфты соответствует требованиям API Spec 5 СТ.

Качественная оценка резьбы проводилась по результатам измерений геометрических параметров резьбы муфты, представленных в таблицах 1, 2.

Таблица 1. – Результаты измерения геометрических параметров резьбы в соответствии с ГОСТ Р 53365-2009

Наименование параметра	Номер измерения	Полученные значения, мм	Значение по ГОСТ Р 53365-2009
Шаг резьбы, мм	1	5,08	5,08 ± 0,10
	2	5,10	
	3	5,09	
	среднее	5,09	
Высота профиля, мм	1	1,59	1,60 ± 0,03
	2	1,62	
	3	1,60	
	среднее	1,60	
Угол профиля	1	13°	13°
	2	13°	
	3	13°	
	среднее	13°	

⁷ Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия: ГОСТ 4543-2016. – Введ. 01.10.2017. – М.: Стандартинформ, 2019. – 53 с.

Продолжение таблицы 1

Наименование параметра	Номер измерения	Полученные значения, мм	Значение по ГОСТ Р 53365-2009
Ширина вершины профиля, мм	1	2,29	2,29
	2	2,29	
	3	2,29	
	среднее	2,29	
Ширина впадины профиля, мм	1	2,47	2,43 ^{+0,05}
	2	2,48	
	3	2,48	
	среднее	2,48	

Таблица 2. – Результаты измерения геометрических параметров резьбы в соответствии с API Spec 5 B

Наименование параметра	Номер измерения	Полученные значения, мм	Значение по API Spec 5 B
Шаг резьбы, дюйм	1	0,200	0,200
	2	0,201	
	3	0,200	
	среднее	0,200	
Высота профиля, дюйм	1	0,063	0,062 ± 0,001
	2	0,063	
	3	0,063	
	среднее	0,063	
Угол профиля	1	13°	13°
	2	13°	
	3	13°	
	среднее	13°	
Ширина вершины профиля, дюйм	1	0,097	0,099 ^{-0,003}
	2	0,097	
	3	0,098	
	среднее	0,097	
Ширина впадины профиля, дюйм	1	0,103	0,101 ^{+0,003}
	2	0,103	
	3	0,103	
	среднее	0,103	

Определено, что качество резьбы по геометрическим параметрам резьбы соответствует ГОСТ Р 53365-2009⁸ и API Spec 5 CT (API Spec 5 B).

Испытание на растяжение выполнялось на образцах, вырезанных из целых участков муфты. Скорость нагружения образцов при испытаниях составляла 5 мм/мин. Результаты механических испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Механические свойства муфты после испытания на растяжение в сравнении с данными сертификата и требованиями API 5CT

Маркировка образцов	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
1	945	1036
2	928	1016
среднее	937	1026
Сертификат качества 32301954 АО «Таганрогский металлургический завод» (партия 20021, плавка 93722)	961	1025
Требования API 5CT (группа прочности P110)	min 758 max 965	min 862

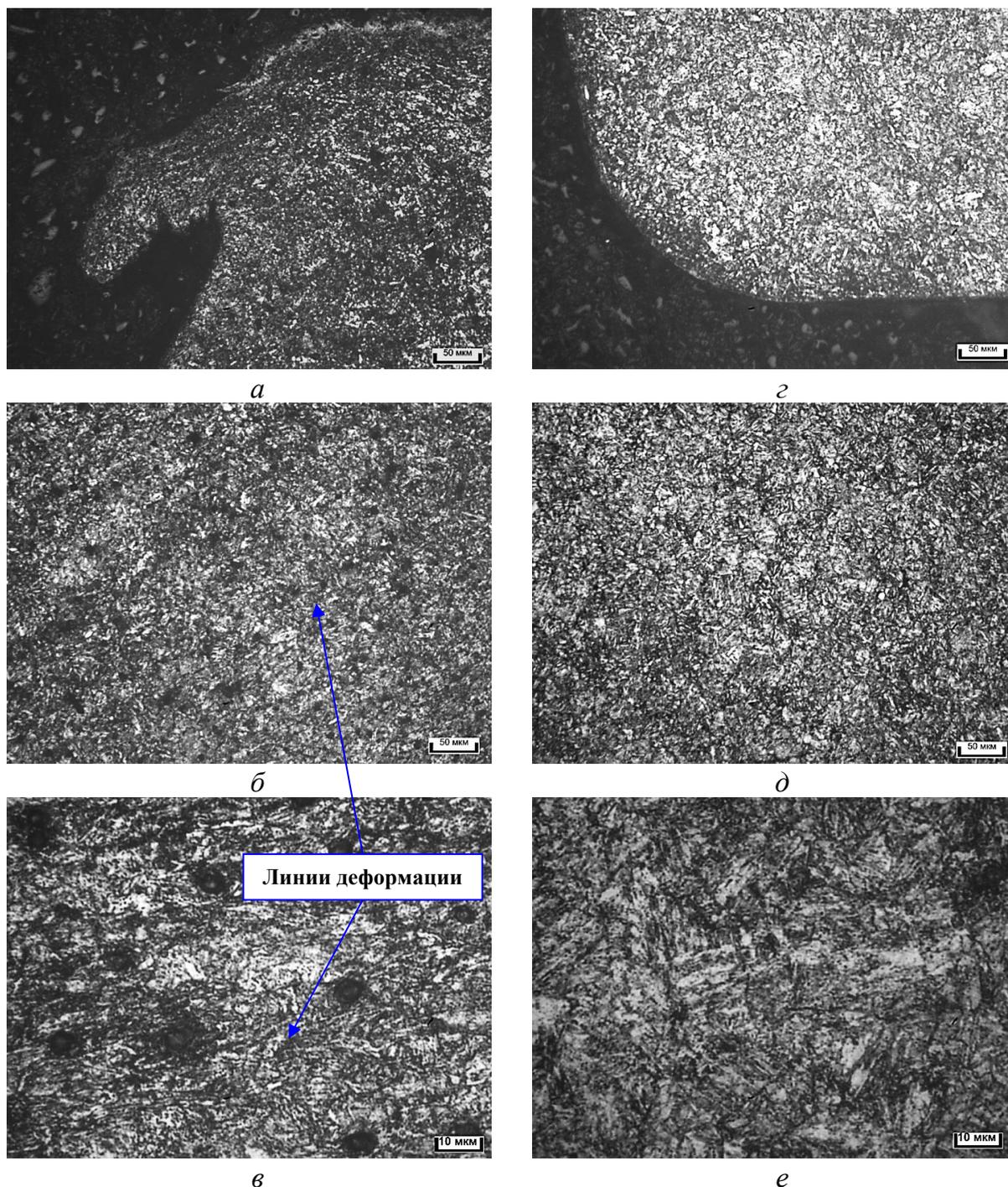
Сравнение результатов испытаний на растяжение с сертификатом качества АО «Таганрогский металлургический завод» и требованиями стандарта API 5CT показало, что по механическим свойствам муфта соответствует заявленной группе прочности P110.

⁸ См. сноску 6.

Микроструктура образца на участке разрушения и на целом участке представлена на рисунке 2. Микроструктура представляет собой сорбит, полученный в результате закалки с высоким отпуском, что соответствует требованиям API Spec 5 CT.

Твердость по Роквеллу составляет 30 HRC, что подтверждает термообработанное состояние материала после закалки с высоким отпуском.

В районе смятия резьбы (рис. 2 а-в) присутствуют линии деформации, свидетельствующие о приложении значительных нагрузок в процессе эксплуатации к изделию. На остальном (неразрушенном) участке (рис. 2 г-е) микроструктура однородная, без деформационных искажений.



а – смятие витка, x100; б, в – линии деформации, x100, x500; г – фрагмент целого зуба, x100; д, е – сорбит, полученный после закалки с высоким отпуском, x100, x500

Рисунок 2. – Микроструктура на участке разрушения муфты (а-в) и на неразрушенном участке (г-е)

Исследования показали, что муфта трубы обсадной $\varnothing 140$ мм Речицкого месторождения по элементному составу (сера, фосфор), механическим характеристикам, качеству резьбы, режимам термообработки соответствует сертификату № 32301954 АО «Таганрогский металлургический завод» (партия 20021, плавка 93722) и требованиям API Spec 5 CT (API Spec 5 B). Смятие резьбы, деформирование витков и наличие трещин свидетельствуют о превышении эксплуатационных нагрузок. Вывод носит информационный характер, т.к. расчеты на прочность и установление причин превышения эксплуатационных нагрузок не входят в область аккредитации Испытательного центра.

Исследование причин разрушения шпильки соединительной. Определение причины разрушения шпильки проводилось путем сравнения ее элементного состава, структуры, твердости и микротвердости с целой шпилькой. Изучалась морфология излома разрушенной шпильки.

В результате исследований определен элементный состав.

Целая шпилька: С – 0,39 %, S – 0,020 %, Cr – 0,95 %, Mn – 0,90 %, Si – 0,30 %, Mo – 0,15 %, Ni – 0,13 %, Cu – не более 0,1 %, Ti – 0,02 %, Al – 0,02 %, P – не более 0,02 %, V – не более 0,01 %, Nb – не более 0,01 %, Fe – основа.

Разрушенная шпилька: С – 0,39 %, S – 0,032 %, Cr – 0,99 %, Mn – 0,80 %, Si – 0,33 %, Mo – 0,17 %, Ni – 0,17 %, Cu – не более 0,1 %, Ti – 0,03 %, Al – 0,02 %, P – не более 0,02 %, V – не более 0,01 %, Nb – не более 0,01 %, Fe – основа.

Установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений материалы целой и разрушенной шпилек соответствуют стали марки 38ХГМ (ГОСТ 4543-2016⁹).

Общий вид шпилек представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. – Общий вид (а, в) и морфология излома (б) шпилек, предоставленных на исследование, х4

Визуальный осмотр разрушенной шпильки показал (рис. 3а), что шпилька изогнута, разрушение произошло в районе резьбы. Поверхность излома частично затерта. Морфологический анализ излома выявил присутствие круговых деформационных линий, свидетельствующих о разрушении шпильки при кручении. Морфология поверхности излома разрушенной шпильки представлена на рисунках 3б и 4.

На поверхности излома в районе резьбы наблюдается участок очага разрушения (рис. 4 а, б) и долом (рис. 4 а, в). От очага разрушения отходят лучи развития трещины, долом находится на противоположной стороне шпильки в виде выкрашивания вершины витка резьбы.

⁹ См. сноску 7.

Твердость определялась по Роквеллу и составила: целая часть – 35–39 HRC, разрушенная часть – 29–34 HRC. Класс прочности шпилек определялся по твердости по Роквеллу согласно ГОСТ 1759.4-87¹⁰ «Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний».

Исходя из полученной твердости, установлено, что класс прочности целой шпильки – 10.9 (35–39 HRC), что соответствует номинальному временному сопротивлению – 1000 Н/мм², разрушенной шпильки – 9.8 (29–34 HRC), номинальное временное сопротивление составляет 900 Н/мм². Временное сопротивление разрушенной шпильки на 10 % меньше, чем целой шпильки класса прочности 10.9.

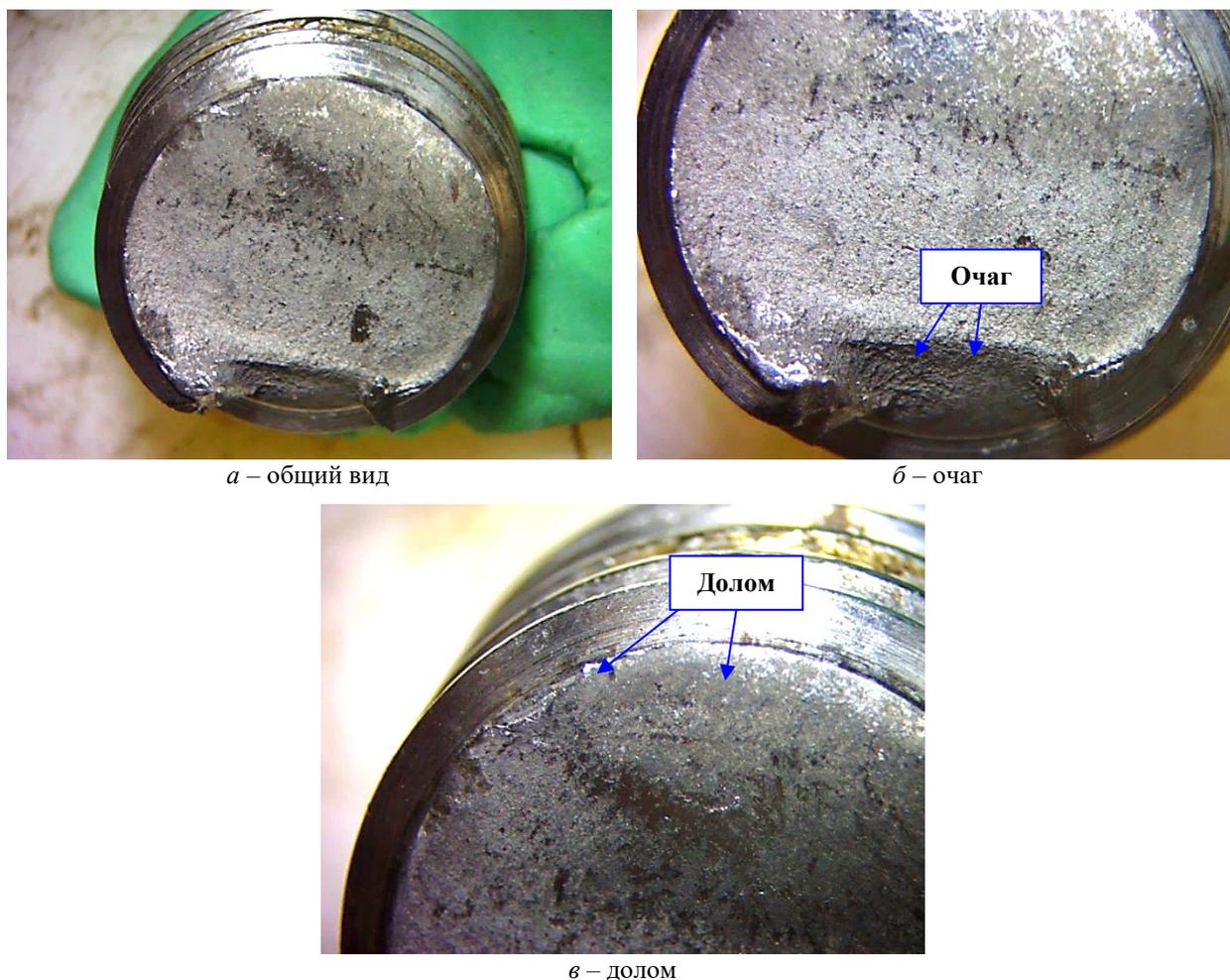


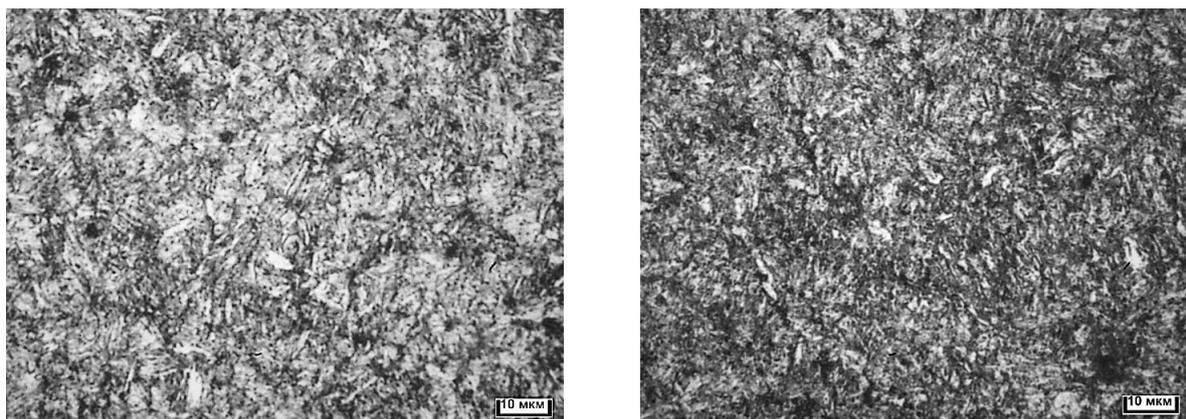
Рисунок 4. – Морфология излома разрушенной шпильки

Микроструктура шпилек приведена на рисунке 5.

Как видно из рисунка 5, микроструктура шпилек троостсорбитная, полученная в результате закалки с отпуском. Микроструктура разрушенной шпильки отличается от целой, большим количеством сорбитной составляющей в троостсорбите, на что также указывает меньшая, по сравнению с целой, твердость.

Причиной разрушения шпильки является развитие преждевременных усталостных явлений в материале шпильки с классом прочности 9.8, вызванных превышением предела прочности при эксплуатации.

¹⁰ Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний: ГОСТ 1759.4-87. – Введ. 01.01.1989. – М.: Стандартинформ, 20106. – 17 с.



а – целая

б – разрушенная

Рисунок 5. – Микроструктура шпилек

Исследование причин разрушения кольца замковой опоры (Вишанское месторождение). Для определения причины разрушения проведен анализ элементного состава, исследование микроструктуры, морфологии излома, измерение твердости.

Элементный состав кольца следующий: С – 0,40 %, Cr – 13,5 %, Si – 0,7 %, Mn – 0,3 %, Ni – 0,2 %, Cu – 0,08 %, V – 0,04 %, Ti – 0,03 %, Mo – не более 0,02 %, P – не более 0,02 %, Fe – основа.

В результате исследований установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений материал образца соответствует стали марки 40Х13 (ГОСТ 5632-2014¹¹).

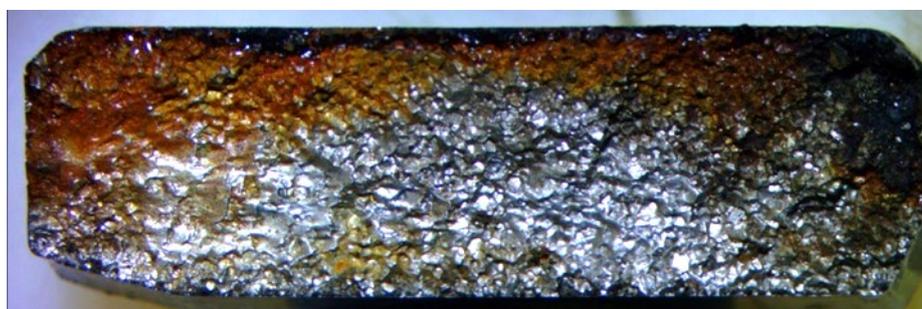
Общий вид образца кольца замковой опоры и морфология излома представлены на рисунке 6.



а – общий вид



б – общий вид



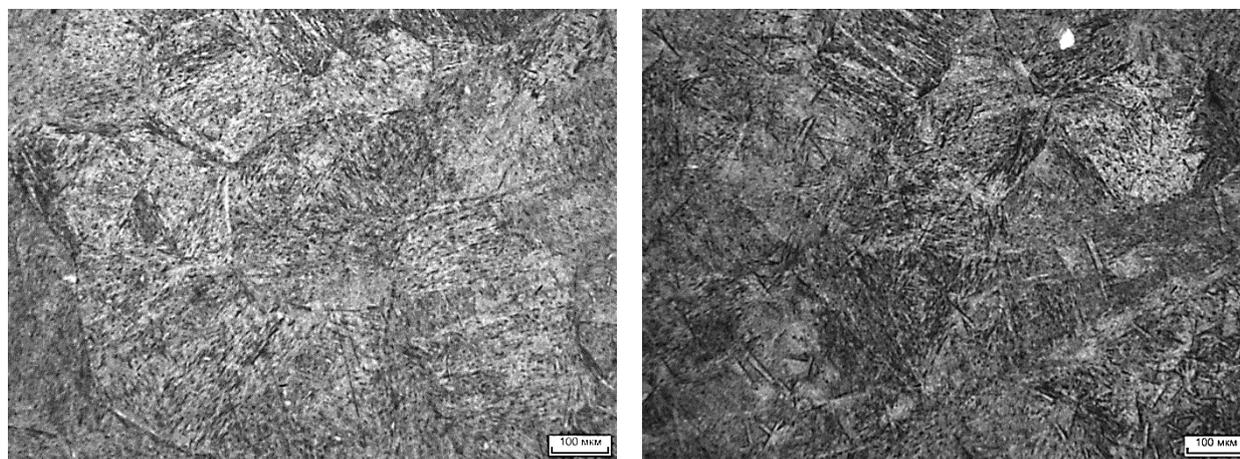
в – морфология излома, х50

Рисунок 6. – Разрушенное кольцо замковой опоры Вишанского месторождения

¹¹ Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные: ГОСТ 5632-2014. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2015. – 54 с.

На рисунке 6 показано, что на боковой поверхности кольца присутствует трещина глубиной на полную толщину образца. Излом крупнокристаллический. Порядка 1/3 части излома окислена и имеет ржавый вид, что указывает на то, что деталь разрушилась не одновременно, а некоторое время перед разрушением проработала. Развитие трещины происходило по границам зерен.

Микроструктура кольца замковой опоры представлена на рисунке 7.



а – под изломом *б* – на расстоянии от излома
Рисунок 7. – Микроструктура кольца замковой опоры Вишанского месторождения

Микроструктура крупнозернистая, представляет собой троостомартенсит с карбидами внутри и по границам зерен. Размер аустенитного зерна от 0,2 до 0,4 мм (среднее 0,3 мм), что соответствует 0 баллов зерна по ГОСТ 5639-82¹². Микроструктура получена в результате закалки с последующим отпуском. Твердость составляет 46-50 HRC.

Определено, что разрушение кольца замковой опоры Вишанского месторождения произошло из-за получения в процессе термообработки (закалки) в материале крупнозернистой микроструктуры, имеющей повышенную хрупкость. Разрушение произошло по границам крупного аустенитного зерна.

Исследование причин разрушения насосной штанги НШ-19 (Давыдовское нефтяное месторождение). Элементный состав штанги следующий: С – 0,42 %, S – 0,0068 %, P – 0,01 %, Mn – 1,0 %, Si – 0,25 %, Cr – 1,2 %, Ni – 0,04 %, Cu – 0,05 %, Mo – 0,21 %, V – не более 0,02 %, Fe – основа.

В результате исследований установлено, что по элементному составу с учетом погрешности измерений материал образца соответствует стали марки 40ХГМА (ГОСТ 4543-2016¹³).

Общий вид штанги и морфология излома представлены на рисунке 8, из которого видно, что излом затерт и покрашен краской. Для исследования морфологии излома проводилось удаление краски растворителем. Участки с удаленной краской показали, что на изломе присутствуют затертые бороздки – ступеньки усталости, что свидетельствует об усталостном характере разрушения.

Результаты испытаний на растяжение и ударный изгиб приведены в таблице 4. Проверка на ударный изгиб проводилась по требованиям заказчика.

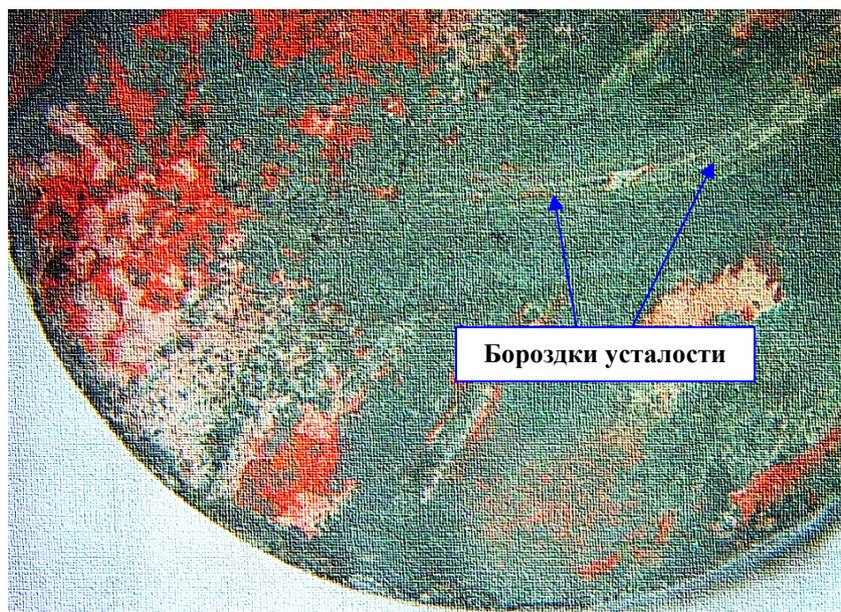
По механическим свойствам штанга соответствует требованиям класса Д ТУ 3665-020-48416997-2003 (по ТУ предел прочности должен находиться в диапазоне 793–965 МПа, предел текучести – не менее 586 МПа). Твердость по Роквеллу составляет 24-25 HRC.

¹² Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна: ГОСТ 5639-82. – Введ. 01.01.1983. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 21 с.

¹³ См. сноску 7.



а – общий вид



б – морфология излома

Рисунок 8. – Фрагмент штанги НШ-19 Давыдовского месторождения

Таблица 4. – Механические свойства материала штанги после испытания на растяжение и ударный изгиб

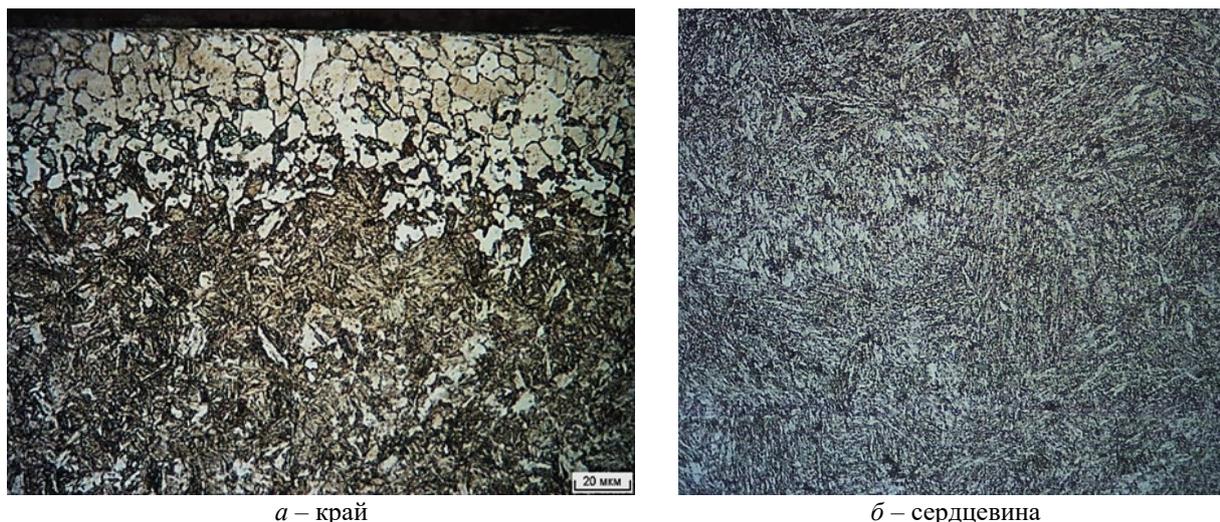
№ образца	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	КСУ, Дж/см ²
1	917	725	18,4	56,5	62
2	913	712	17,7	55,9	61
3	918	722	17,4	55,3	65
среднее	916	720	17,8	55,9	63

Микроструктура представлена на рисунке 9. Исследования показали, что у края поверхности присутствует обезуглероженный слой со структурой феррита и сорбита на глубину до 0,1 мм (рис. 9а).

Микроструктура штанги представляет собой сорбит (рис. 9б). Микроструктура получена в результате закалки с высоким отпуском (улучшения). Размер зерна находится в диапазоне 5–15 мкм (средний 11 мкм, 10 баллов). Размер зерна материала штанги соответствует требованиям ТУ 3665-020-48416997-2003. По ТУ размер зерна должен быть не крупнее 6 баллов (44 мкм).

В результате проведенных исследований образца насосной штанги НШ-19 Давыдовского нефтяного месторождения определено:

– химический состав соответствует требованиям ГОСТ 4543-2016 и ТУ 3665-020-48416997-2003;



a – край
**Рисунок 9. – Микроструктура образца насосной штанги НШ-19
Давыдовского нефтяного месторождения**
b – сердцевина

- механические свойства (предел прочности и предел текучести) соответствуют классу Д по ТУ 3665-020-48416997-2003;
- ударная вязкость для стали 40ХГМА ТУ не регламентируется;
- твердость ТУ не регламентируется и определяется факультативно;
- микроструктура сердцевины – сорбит, получена в результате закалки с высоким отпуском. Микроструктура ТУ не регламентируется. Размер зерна соответствует требованию п. 2.4.18 ТУ 3665-020-48416997-2003;
- присутствует обезуглероженный слой, который ТУ не регламентируется.

Установлено, что разрушение произошло в результате усталостных процессов, происходящих в материале штанги, вызванных превышением предела прочности материала в процессе эксплуатации (предположительно, изгибные напряжения), т.к. химический состав, механические свойства, структура (размер зерна) соответствуют требованиям ГОСТ 4543-2016¹⁴ и ТУ 3665-020-48416997-2003.

Заключение

При проходке скважин основными элементами бурильной колонны помимо бурового инструмента (долота) являются бурильные трубы, соединенные с помощью различных деталей (муфты, кольца, замки, шпильки), а также разные вспомогательные детали и узлы (переходники, переводники, калибраторы и т.д.). В процессе бурения происходит периодическое свинчивание-развинчивание составных частей бурильной колонны, что при многократном и длительном воздействии может вызывать разрушение деталей и усложнение процесса бурения скважин.

Было проведено комплексное исследование образцов, разрушенных в процессе бурения деталей бурильной колонны, предоставленных ГПО «Белоруснефть», с целью установления причин их разрушения. Анализ элементного состава, морфологии излома, структуры, механических свойств, твердости разрушенных деталей нефтебурового оборудования, работающих под действием эксплуатационных нагрузок различной степени интенсивности и типов нагружения показали, что наиболее часто встречающимися причинами разрушения являются:

- превышения эксплуатационных нагрузок, о чем свидетельствуют деформации, смятия, наличие трещин;

¹⁴ См. сноску 7.

- технологические дефекты, связанные с нарушением режимов термообработки, приводящие к получению крупнозернистой структуры, имеющей повышенную хрупкость; недостаточная твердость; обезуглероженность поверхности;
- усталостные явления материала, вызываемые знакопеременными (изгибными, крутящими) нагрузками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Венгринович, В. Научный анализ и оценка рисков в системах безопасности / В. Венгринович // Наука и инновации. – 2013. – № 6 (124). – С. 4–7. – EDN: TNCEYH.
2. Кушнарченко, В.М. Анализ причин отказов оборудования и трубопроводов / В.М. Кушнарченко, В.С. Репях, Е.В. Кушнарченко, Е.Ю. Чирков // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – № 10 (116). – С. 153–159. – EDN: MVSQGV.
3. Жарский, И.М. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин: учебник / И.М. Жарский, И.Л. Баршай, Н.А. Свидунович, Н.В. Спиридонов. – Минск: Вышэйшая школа, 2010. – 336 с. – ISBN 978-985-06-1833-7.
4. Пантелеенко, Ф.И. Методология оценки состояния материала ответственных металлоконструкций / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский. – Минск: БНТУ, 2010. – 194 с. – ISBN 978-985-525-570-4.
5. Кабалдин, Ю.Г. Информационные модели структурообразования и усталостного разрушения металлических материалов / Ю.Г. Кабалдин, С.Н. Муравьев // Вестник машиностроения. – 2007. – № 8. – С. 46–50. – EDN: LYDADZ.
6. Махутов, Н.А. Роль механических испытаний в обосновании прочности, ресурса и безопасности / Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 9. – С. 56–63. – EDN: KUSZDN.
7. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан; пер. с англ. под ред. С.Л. Баженова. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с. – ISBN 5-94836-018-0.
8. Ильющенко, А.Ф. Атлас производственных разрушений различных конструкций / А.Ф. Ильющенко, Л.В. Маркова, В.А. Чекан [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 313 с. – ISBN 978-985-08-2142-3.
9. Фомихина, И.В. Механизмы деградации структуры конструкционных сталей, методы повышения эксплуатационных свойств изделий из них: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / Фомихина Ирина Викторовна; Институт порошковой металлургии. – Минск, 2018. – 398 л.
10. Фомихина, И.В. Методы контроля и пути устранения технологических и эксплуатационных дефектов в конструкционных сталях: монография / И.В. Фомихина; Национальная академия наук Беларуси, Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа. – Минск: Беларуская навука, 2024. – 302 с. – ISBN 978-985-08-3205-4.

**Исследование структуры и свойств конструкционных сталей
разрушенных деталей нефтебурового оборудования**

**Investigation of the structure and properties of structural steels
of destroyed oil drilling equipment parts**

Фомихина Ирина Викторовна

доктор технических наук,
доцент

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

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

Email: ivfom@tut.by

SPIN-код: 5660-6815

Irina V. Fomikhina

Grand 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, Belarus, Minsk

Email: ivfom@tut.by

ORCID: 0009-0007-2164-412X

ScopusID: 6507443284

Бирюк Виктор Алексеевич

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности,
заведующий кафедры

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

Email: vikbiruk72@gmail.com

SPIN-код: 5948-1623

Viktor A. Biryuk

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,
Head of the Chair

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

Email: vikbiruk72@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3110-9557

ScopusID: 6507076955

Маркова Людмила Владимировна

кандидат технических наук

Государственное научное учреждение
«Институт порошковой металлургии
имени академика О.В. Романа», отделение
исследований и испытаний материалов,
заместитель заведующего отделением

Адрес: ул. Платонова, 41,
220005, Беларусь, г. Минск

Email: lv345lv@gmail.com

SPIN-код: 7946-2117

Lyudmila V. Markova

PhD in Technical Sciences

State Scientific Institution «Powder
Metallurgy Institute», Materials
Research and Testing Department,
Deputy Head of the Department

Address: Platonov str., 41,
220005, Belarus, Minsk

Email: lv345lv@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3396-9235

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS OF DESTROYED OIL DRILLING EQUIPMENT PARTS

Fomikhina I.V., Biruk V.A., Markova L.V.

Purpose. Determination of the causes of destruction of oil drilling equipment parts made of structural steels under the influence of operational loads.

Methods. The research was carried out on certified equipment from the Testing Center of Powder Metallurgy Institute named after of O.V. Roman accredited by the State Standard of RB (accreditation certificate BY/112 1.0263). The studied samples were provided by the State Production Association «Belorusneft».

Findings. The studies of the elemental composition, fracture morphology, structure, mechanical properties, and hardness of oil drilling equipment parts destroyed under the influence of operational loads have been carried out. The causes of the destruction of the casing coupling, stud, lock support ring and pump rod of drilling rigs operated at the largest fields of «Belorusneft» have been established.

Application field of research. The research results can be used in industrial safety subjects operating potentially dangerous facilities working under operating loads of varying intensity and loading types in order to increase the industrial safety level.

Keywords: oil drilling equipment, drilling rig parts, structure, properties, hardness, fracture morphology, breakdown, heat treatment, industrial safety.

(The date of submitting: January 10, 2025)

REFERENCES

1. Vengrinovich V. Nauchnyy analiz i otsenka riskov v sistemakh bezopasnosti [Scientific analysis and risk assessment of security systems]. *Nauka i innovatsii*, 2013. No. 6 (124). Pp. 4–7. (rus). EDN: TNCEYH.
2. Kushnarenko V.M., Repyakh V.S., Kushnarenko E.V. Chirkov E.Yu. Analiz prichin otkazov oborudovaniya i truboprovodov [Analysis of causes of equipment and pipeline failures]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010. No. 10 (116). Pp. 153–159. (rus). EDN: MVSQGV.
3. Zharskiy I.M., Barshay I.L., Svidunovich N.A., Spiridonov N.V. *Tekhnologicheskie metody obespecheniya nadezhnosti detaley mashin* [Technological methods of ensuring reliability of machine parts]: textbook. Minsk: Vysheyshaya shkola, 2010. 336 p. (rus). ISBN 978-985-06-1833-7.
4. Panteleenko F.I., Snarskiy A.S. *Metodologiya otsenki sostoyaniya materiala otvetstvennykh metallokonstruktsiy* [Methodology for assessing the material condition of critical steel structures]. Minsk: BNTU, 2010. 194 p. (rus). ISBN 978-985-525-570-4.
5. Kabaldin Yu.G. Murav'ev S.N. Informatsionnye modeli strukturoobrazovaniya i ustalostnogo razrusheniya metallicheskih materialov [Information models of structure formation and fatigue failure of metallic materials]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2007. No. 8. Pp. 46–50. (rus). EDN: LYDADZ.
6. Makhutov N.A. Rol' mekhanicheskikh ispytaniy v obosnovanii prochnosti, resursa i bezopasnosti [A role of mechanical tests in substantiation of the strength life time and safety]. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2007. Vol. 73, No. 9. Pp. 56–63. (rus). EDN: KUSZDN.
7. Brandon D. Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya* [Microstructural Characterization of Materials]. Ed. by S.L. Bazhenov. Moscow: Tekhnosfera, 2004. 384 p. (rus). ISBN 5-94836-018-0.
8. Il'yushchenko A.F., Markova L.V., Chekan V.A., Fomikhina I.V., Koleda V.V. *Atlas proizvodstvennykh razrusheniy razlichnykh konstruktsiy* [Atlas of production failures of various structures]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2017. 313 p. (rus). ISBN 978-985-08-2142-3.
9. Fomikhina I.V. *Mekhanizmy degradatsii struktury konstruktsionnykh staley, metody povysheniya ekspluatatsionnykh svoystv izdeliy iz nikh* [Mechanisms of degradation of the structure of structural steels, methods for improving the performance properties of products made from them]. Grand PhD tech. sci. diss.: 05.16.09; Powder Metallurgy Institute. Minsk, 2018. 398 p. (rus).
10. Fomikhina I.V. *Metody kontrolya i puti ustraneniya tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh defektov v konstruktsionnykh stalyakh* [Methods of control and ways to eliminate technological and operational defects in structural steels]: monograph. Minsk: Belaruskaya navuka, 2024. 302 p. (rus). ISBN 978-985-08-3205-4.

Copyright © 2025 Fomikhina I.V., Biruk V.A., Markova L.V.

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

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАМЕНИ

Аушев И.Ю., Фомихина И.В., Веренич, Е.В., Рыжов М.Э.

Цель. Определить микротвердость и изменение микроструктуры металлических элементов многожильных кабельных изделий с алюминиевыми и медными жилами при воздействии пламени.

Методы. Металлография, дюротметрия, а также общенаучные методы исследования: анализ, синтез, сравнение и обобщение.

Результаты. Определены микроструктура, размеры и микротвердость зерен медных и алюминиевых металлических элементов кабельных изделий после воздействия пламени.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы при подготовке специалистов в сфере предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, а также в ходе проведения пожарно-технических экспертиз при расследовании причин пожаров.

Ключевые слова: кабельные изделия, аварийный режим работы, микроструктура, микротвердость, расследование пожаров.

(Поступила в редакцию 15 января 2025 г.)

Введение

Пожары, вызванные неисправностями в электропроводке, представляют собой одну из наиболее распространенных и значительных угроз пожарной безопасности в Республике Беларусь. Анализ статистических данных свидетельствует о том, что из общего числа пожаров около 25 % вызваны аварийными режимами работы электрической сети¹. При этом около 70 % от всех случаев пожаров приходится на жилой сектор, включая многоквартирные дома и частные домовладения. Оставшиеся случаи пожаров фиксируются на производственных объектах, складских помещениях и в других учреждениях.

Кабельные изделия считаются одними из самых пожароопасных компонентов электротехнического оборудования. Это связано с их конструктивными особенностями, которые предполагают сочетание горючих материалов (таких как изоляция, оболочки кабелей и другие полимерные компоненты) и потенциальных источников зажигания. Последние включают искры, электрические дуги, а также элементы, нагретые в результате протекания электрического тока, особенно при эксплуатации электрооборудования в условиях аварийных режимов работы [1].

Основными аварийными электрическими режимами, которые приводят к возникновению возгораний проводов и кабелей, являются:

1. Короткие замыкания (КЗ) – когда происходит непредусмотренный контакт токоведущих жил, что приводит к мгновенному выделению большого количества тепловой энергии.
2. Перегрузки – состояние, при котором через токоведущие части протекают токи, значительно превышающие номинальные значения. Это вызывает их перегрев.
3. Высокое переходное сопротивление – возникает в местах контактных соединений, где из-за слабого контакта выделяется значительное количество тепла.

В аварийных условиях протекание сверхтоков (токов, многократно превышающих номинальный уровень) по токопроводящим жилам и элементам электрической цепи создает критические температурные условия. Это может приводить к возгоранию кабелей, особенно

¹ Ежегодные отчеты о чрезвычайных ситуациях // Официальный сайт Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – 2024. – 15 янв. – Режим доступа: <https://mchs.gov.by/novosti-i-sobytiya/analitika>. – Дата доступа: 10.12.2024.

силовых и высоковольтных. При таких температурах выделяется достаточно энергии для начала термического разложения (пиролиза) изоляционных материалов, которое сопровождается выделением горючих газов. Эти газы, в свою очередь, служат топливом для развития открытого горения [2].

Процесс пиролиза электроизоляции начинается при относительно низких температурах, что делает такие материалы особенно уязвимыми в условиях аварийной эксплуатации. Нагрев токоведущих частей до критических температур и локальное повышение температуры в местах контактов из-за переходного сопротивления могут создавать условия для развития возгорания даже при кратковременных перегрузках.

Таким образом, кабельные изделия представляют собой объект повышенного пожароопасного риска, особенно при эксплуатации в неблагоприятных условиях или при несоблюдении норм технического обслуживания. Это подтверждает необходимость строгого контроля качества кабельной продукции, внедрения современных противопожарных стандартов и регулярного мониторинга состояния электрооборудования, чтобы минимизировать вероятность аварийных режимов и предотвратить развитие пожаров.

Основная часть

Тепловые повреждения проводников, вызванные прохождением сверхтока (перегрузки), напрямую зависят от степени кратности этого сверхтока по отношению к номинальному значению. При воздействии тока, кратность которого превышает допустимые пределы, токоведущая жила подвергается значительному нагреву на всем ее протяжении. Этот процесс сопровождается рядом изменений, которые имеют как физический, так и химический характер.

Одним из ключевых последствий воздействия сверхтоков является термическая деградация изоляции, прилегающей к токоведущей жиле. Это включает следующие этапы [1]: плавление изоляционного материала из-за локального перегрева; карбонизация – образование углеродистой корки на месте разрушения изоляции; отслоение изоляции от поверхности проводника вследствие потери ее адгезионных свойств.

Кроме того, на поверхности токоведущей жилы возникают характерные признаки, которые позволяют экспертам идентифицировать факт протекания сверхтоков. Эти признаки включают: локальные оплавления металла в местах максимального тепловыделения; вздутия или утолщения проводника, вызванные тепловым расширением; образование «шеек» – сужений проводника в местах интенсивного нагрева; фрагментацию – разрывы или расслоения структуры металла вследствие термических и механических нагрузок. Эти изменения свидетельствуют о том, что по проводнику проходил ток, величина которого превышала номинальное значение в 3–4 раза и более. Такие экстремальные условия эксплуатации не только ведут к разрушению самого проводника, но и значительно повышают риск возгорания. Плавление и карбонизация изоляции сопровождаются выделением горючих газов, которые могут стать причиной дальнейшего развития пожара.

Таким образом, диагностика повреждений токоведущих жил и изоляции в условиях перегрузки играет важную роль в пожарно-технических экспертизах. Идентификация вышеописанных признаков позволяет не только определить факт перегрузки, но и установить ее возможное значение, что способствует более точному восстановлению картины произошедшего инцидента.

Одним из наиболее изученных электрических пожароопасных режимов является КЗ, что обусловлено его значением как с пожарно-профилактической, так и с экспертно-криминалистической точек зрения. Первые исследования, посвященные анализу следов, оставляемых КЗ, были проведены и опубликованы В. Хагемайером в 1960-х гг. [3]. В дальнейшем значительный вклад в развитие данных исследований был внесен специалистами ВНИИПО МВД СССР под руководством профессора Г.И. Смелкова. Именно тогда была разработана

теоретическая основа, объясняющая связь электрических аварийных режимов с возникновением пожаров, а также создана первая методика инструментального анализа момента возникновения КЗ на медных и алюминиевых проводниках. Эта методика позволила, как тогда считалось, дифференцировать дуговые оплавления, вызванные так называемыми первичными и вторичными КЗ [1; 2].

Первичные короткие замыкания (ПКЗ) возникают до пожара или в его начальной стадии. Их отличительной особенностью является то, что повреждения проводников и изоляции происходят в условиях нормальной окружающей среды: при комнатной температуре и стандартном составе атмосферы (21 % кислорода и 79 % азота) [4; 5].

Вторичные короткие замыкания (ВКЗ) появляются в процессе уже развивающегося пожара. В этом случае воздействие высокой температуры и обгорание изоляции приводят к возникновению замыканий между фазой и нулем или между фазами. Для таких ситуаций характерны повышенная температура окружающей среды (выше 200 °С), насыщенность атмосферы продуктами разложения горючих веществ (СО, СО₂) и снижение концентрации кислорода.

При расследовании пожаров ключевое внимание уделяется именно ПКЗ, поскольку они могут быть причиной возгорания. ВКЗ, как правило, возникают в результате воздействия огня и служат следствием развивающегося пожара. Однако без применения специальных инструментальных методов исследований дифференциация ПКЗ и ВКЗ невозможна. Поэтому при проведении пожарно-технических экспертиз участки проводов с характерными оплавлениями изымаются и направляются в лабораторию для дальнейшего анализа.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время на практике для определения причастности к возникновению пожара кабельных изделий наиболее часто используются следующие методы [6]:

- морфологический анализ визуально и методом электронной микроскопии, с помощью которой ведется поиск специфических структур в виде искривленных и закругленных кристаллов, которые образуются, соответственно, при ПКЗ и ВКЗ;

- металлография, заключающаяся в изучении микроструктуры металлов и сплавов, их макроструктуры;

- рентгеноструктурный анализ, в основе которого лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке исследуемого проводника.

Применение этих методов позволяет:

- выявить локальные изменения структуры металла, характерные для дуговых оплавлений;

- установить температурный режим и динамику процессов, вызванных КЗ;

- подтвердить или опровергнуть версию о первичности КЗ в контексте рассматриваемого пожара.

Таким образом, методики анализа дуговых оплавлений, особенно тех, что связаны с ПКЗ, играют ключевую роль в установлении причинно-следственных связей между аварийными режимами в электрических системах и пожарами. Исследование электродуговых оплавлений проводников занимает центральное место в проведении пожарно-технических экспертиз, поскольку версия о возникновении пожара вследствие аварийных режимов в электропроводке рассматривается практически в каждом случае возгорания. Такие исследования позволяют выявить ПКЗ как возможную причину пожара. Однако, несмотря на значимость и широкое применение этих методик, практика расследования пожаров выявляет ряд существенных проблем, связанных с интерпретацией полученных данных.

В ряде случаев характерные признаки, указывающие на наличие ПКЗ, обнаруживаются на нескольких проводниках одновременно, включая те, которые находятся за пределами предполагаемого очага пожара [7]. Это затрудняет установление истинного места возникновения короткого замыкания и причину возгорания.

Результаты, полученные с использованием различных исследовательских методов (например, металлографии, рентгеноструктурного анализа и визуальной морфологии), могут существенно различаться. Иногда они даже противоречат фактическим данным о развитии пожара, что вызывает трудности в формировании однозначного экспертного заключения [8].

Реальные пожары характеризуются многостадийным развитием, влиянием многочисленных факторов (например, температуры, состава горючих газов, наличия кислорода), которые сложно моделировать в лабораторных условиях. Это затрудняет воспроизведение условий, при которых происходило замыкание, и корректное установление его характера (первичного или вторичного).

Существующие методики, хотя и предоставляют базу для анализа электродуговых оплавлений, не являются универсальными [9]. Их применение требует учета множества факторов, таких как: локализация повреждений на проводниках; условия воздействия высоких температур и продуктов горения; взаимодействие материалов, участвовавших в пожаре. Эти аспекты зачастую делают результаты исследований неоднозначными, что подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования методологических подходов.

Для повышения точности экспертиз необходимо: разрабатывать более сложные лабораторные модели, учитывающие влияние многостадийных процессов, происходящих при реальных пожарах; совмещать методы металлографии, рентгеноструктурного анализа и цифровой микроскопии с новыми подходами, такими как компьютерное моделирование развития аварийных режимов; разрабатывать стандарты по оценке достоверности выводов, полученных при использовании разных методик, чтобы минимизировать вероятность ошибок и противоречий.

Таким образом, исследование электродуговых оплавлений остается ключевым инструментом в области пожарной экспертизы. Однако для достижения большей точности и универсальности методик требуется дальнейшее развитие научных подходов, учитывающих сложность и многообразие условий, возникающих при реальных пожарах.

В работах [1; 2; 4; 7; 10; 11] авторы изучали одиночные и двухжильные кабельные изделия, покрытые изоляцией, а также одиночные проводники без изоляции [3]. В данной статье предлагается рассмотреть изменение микроструктуры трех- и четырехжильных кабельных изделий при их нагревании пламенем, имитирующим воздействие пожара (без учета газообразных факторов пожара) методами металлографического и дюрOMETрического анализов.

Исследования проводились в испытательной лаборатории Университета гражданской защиты (аттестат аккредитации № ВУ/112 1.01.02), а также в испытательном центре Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа на базе отделения «Исследования и испытания материалов», аккредитованном на техническую компетентность и независимость (аттестат аккредитации № ВУ/112.02.1.0.0263).

Для приготовления микрошлифов от проводников со следами воздействия дуги короткого замыкания отрезались участки с оплавлением длиной 10–15 мм и заливались в эпоксидную смолу. Приготовление шлифов осуществлялось по классической методике: шлифовка на абразивных шкурках, начиная с крупнозернистой, переходя на мелкозернистые не менее чем в 4–5 переходов. Продолжительность обработки одной шкуркой определялась качеством обработанной поверхности – каждая последующая обработка на поверхности металла должна была полностью вывести риски предыдущей обработки.

После обработки с поверхности шлифа удалялись продукты обработки (частицы абразива) путем протирки ветошью. После шлифовки проводилась полировка на алмазных пастах до зеркального блеска, соответствующего не менее чем 10-му классу чистоты. Травление микрошлифа для выявления микроструктуры осуществлялось травителями. Медные проводники травили 3 %-ным раствором хлорного железа $FeCl_3$ в этиловом спирте, алюминиевые – 10 %-ным водным раствором плавиковой кислоты HF . После травления остатки раствора

удаляли ватным тампоном, смоченным этиловым спиртом, затем промывали спиртом и высушивали фильтровальной бумагой. Для лучшего выявления микроструктуры процессы полировки и травления повторяли несколько раз до четкого ее выявления, при этом снимали поверхностный слой металла глубиной 2×10^{-1} мкм, искажающий микроструктуру.

Микроструктура изучалась на нетравленных и травленных шлифах на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия) при увеличении $\times 100$, $\times 500$. Величина зерна определялась в соответствии с ГОСТ 21073.1². ДюрOMETрические исследования (измерение микротвердости по Виккерсу) проводились на микротвердомере Micromet II фирмы Buehler-Met (Швейцария) с нагрузкой 50 г в соответствии с ГОСТ 9450³.

Для исследования были подготовлены 2 типа кабелей длиной 1 м: с алюминиевой и медной жилами.

Кабель АВВГнг(А) 3×25 ОК 6 кВ предназначен для передачи и распределения электроэнергии в стационарных установках на номинальное переменное напряжение 6 кВ частоты 50 Гц, прокладки в сухих и влажных производственных помещениях, на специальных кабельных эстакадах, в блоках, а также для прокладки на открытом воздухе. Конструкция кабеля: 3 алюминиевые токопроводящие жилы сечением 25 мм²; изоляция из поливинилхлоридного пластиката; внутренняя оболочка выпрессована с заполнением промежутков между жилами из ПВХ пластиката пониженной горючести; поясная изоляция выпрессована из ПВХ пластиката пониженной горючести минимальной толщиной 0,9 мм; электропроводящий экран наложен обмоткой из ленты, изготовленной из электропроводящей прорезиненной ткани номинальной толщиной 0,3 мм, с перекрытием; металлический экран из двух медных лент; оболочка из ПВХ пластиката пониженной горючести.

Огнестойкий кабель ЭМПзнг(А)-FRHF 4×1,5–0,15/0,25 предназначен для прокладки в сухих и влажных производственных помещениях, а также для прокладки на открытом воздухе. Конструкция кабеля: 4 медные многопроволочные токопроводящие жилы сечением 1,5 мм² в изоляции белого цвета из керамообразующей кремнийорганической резины, с заполнением из кремнийорганического компаунда белого цвета. Поверх сердечника наложен экран в виде оплетки из медных проволок и оболочка из полимерной композиции, не содержащей галогенов.

Для исследования микроструктур металлических элементов кабельного изделия вырезались наиболее характерные участки оплавлений, сравниваемые с исходными (рис. 1). Образцы подвергались воздействию открытого пламени в помещении при комнатной температуре без воздействия газообразных продуктов, имитирующих пожар. Для кабеля АВВГнг(А) 3×25 ОК 6 кВ использовалась пропан-бутановая смесь, время воздействия пламени – 40 мин. Для кабеля ЭМПзнг(А)-FRHF 4×1,5–0,15/0,25 – спиртовой раствор, время воздействия пламени – 25 мин. Кабели располагались открыто в стандартном составе атмосферы. Время воздействия пламени подбиралось с учетом предполагаемого завершения процессов рекристаллизации металлов токопроводящих жил.

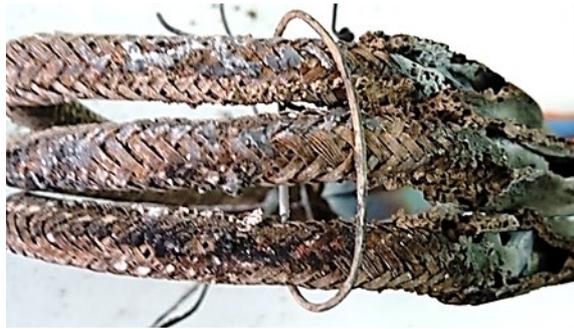
Образцы маркировались следующим образом:

- 1А, 1С – исходные алюминиевые и медные проводники соответственно;
- 2А – алюминиевые проводники в металлическом кожухе;
- 2С – медные проводники в металлической оплетке;
- 3А, 3С – алюминиевые и медные проводники с остатками полимера.

Вырезанные фрагменты заливались в эпоксидную смолу, смешанную с отвердителем в пропорции 10:1. Готовились шлифы (рис. 2) и после травления проводился микроструктурный анализ. Методика приготовления шлифов и составы травителей приведены выше.

² Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур: ГОСТ 21073.1–75. – Введ. 01.07.1976. – М.: Госстандарт, 1975. – 12 с.

³ Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников: ГОСТ 9450–76. – Введ. 01.01.1977. – М.: Госстандарт, 1976. – 36 с.



a – медные проводники в металлической оплетке (2С)



б – медные проводники с остатками полимера (3С)



в – алюминиевые проводники в металлическом кожухе (2А)



г – алюминиевые проводники с остатками полимера (3А)

Рисунок 1. – Характерные участки оплавлений проводников



a – исходные медные проводники (1С)



б – медные проводники в металлической оплетке (2С)



в – медные проводники с остатками полимера (3С)



г – исходные алюминиевые проводники (1А)



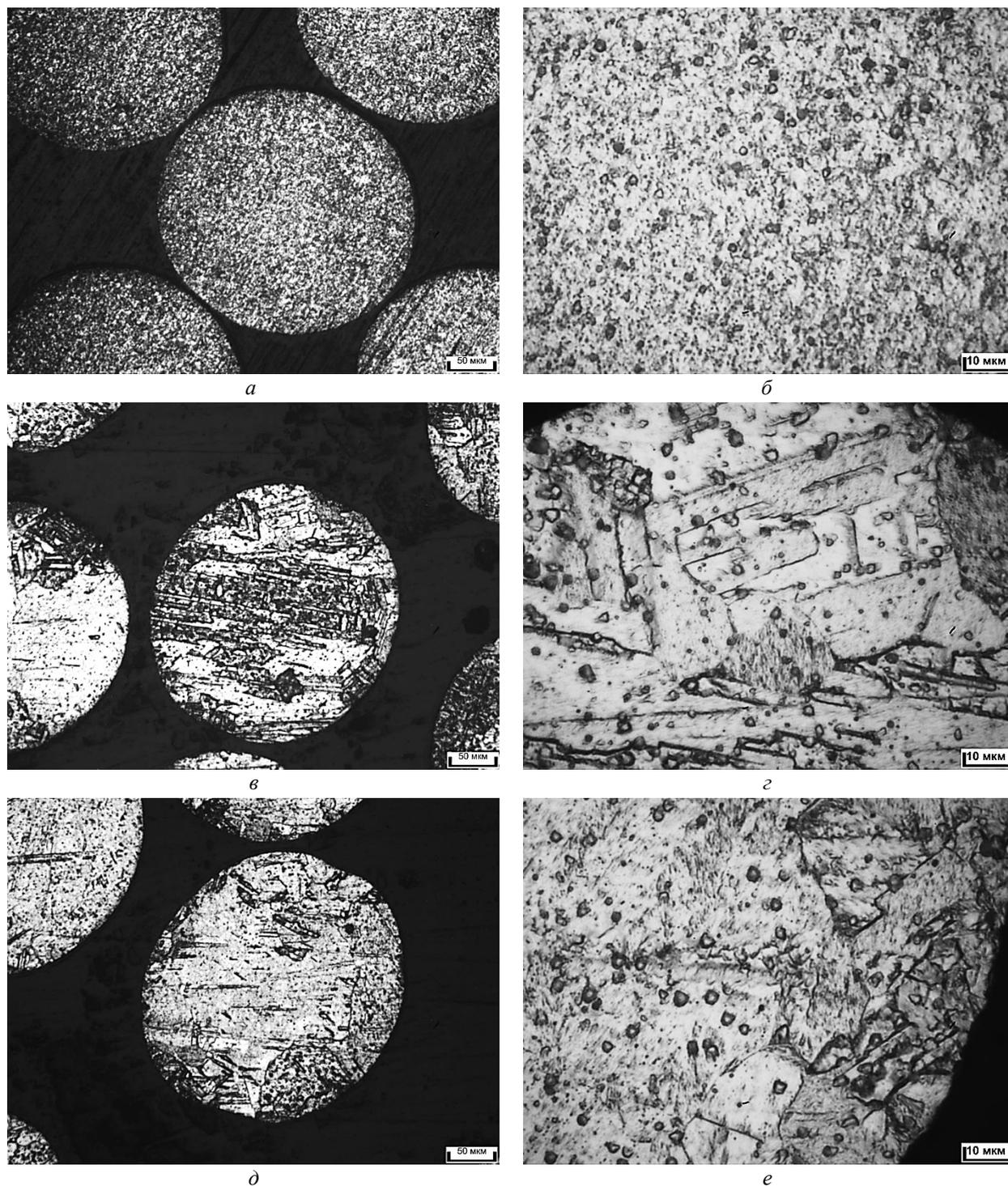
д – алюминиевые проводники в металлическом кожухе (2А)



е – алюминиевые проводники с остатками полимера (3А)

Рисунок 2. – Шлифы с медными и алюминиевыми проводниками, подготовленные к исследованию микроструктуры

Микроструктура медных проводников представлена на рисунке 3.



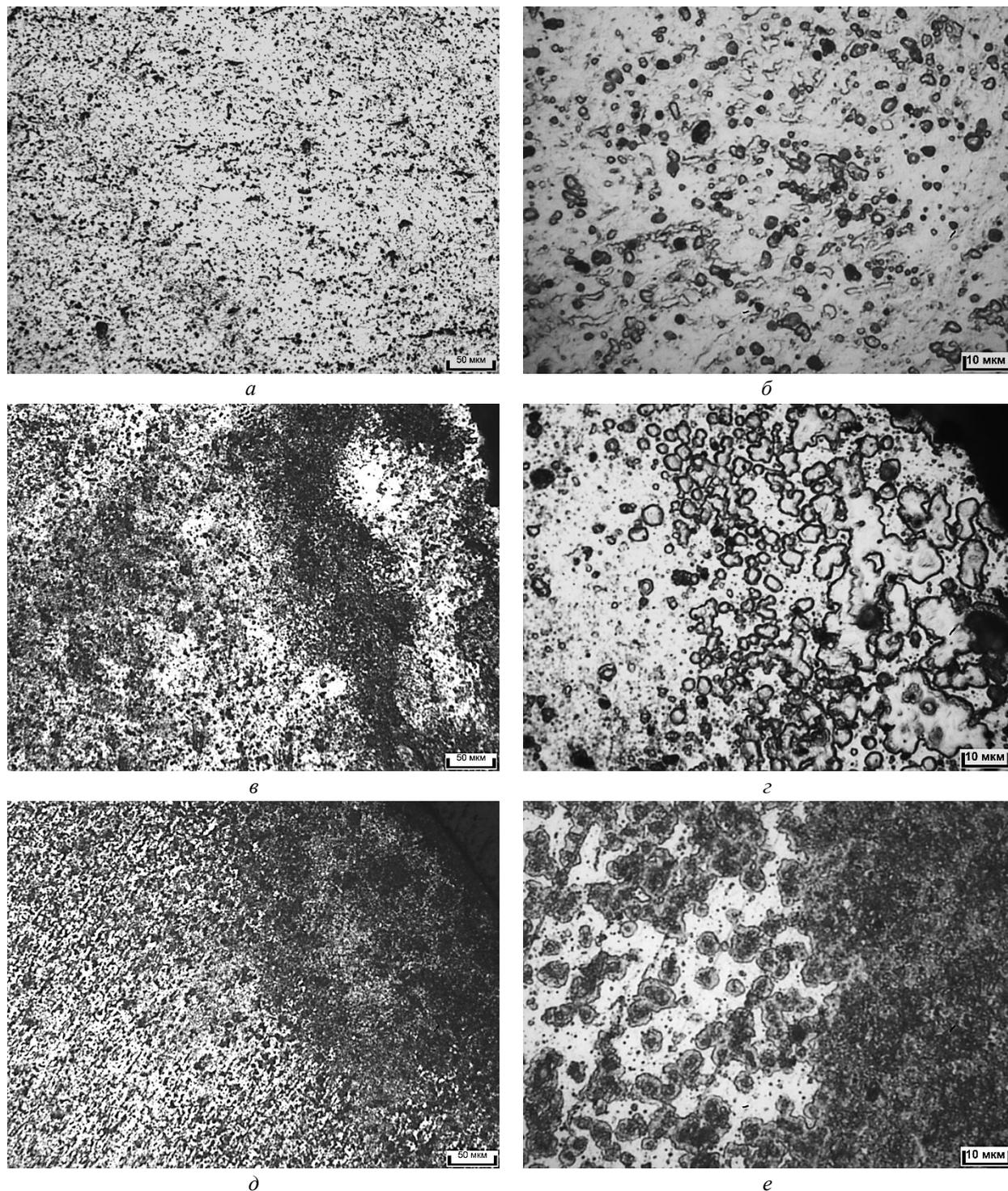
a, б – исходные (1С); *в, г* – в металлической оплетке (2С); *д, е* – с остатками полимера (3С)

Рисунок 3. – Микроструктура медных проводников, х100, х500

В ходе экспериментальных исследований установлено, что медные проводники (рис. 3) в исходном состоянии (1С) имеют мелкозернистую микроструктуру с размером зерна 2–8 мкм (средний 5 мкм). На участке металлической оплетки (2С) наблюдаются рекристаллизационные процессы с увеличением размера зерна от 10 до 150 мкм (средний 80 мкм). На участке с остатками полимера (3С) рекристаллизация проходит не полностью: присутствуют места с мелкозернистой микроструктурой с размером зерна 5–20 мкм и крупнозернистой микроструктурой от 50 до 100 мкм, средний размер зерна проводника составляет 60 мкм. Развитие

рекристаллизационных процессов в проводниках, находящихся в зоне пожара, подтверждается уменьшением микротвердости. Средняя микротвердость исходного медного проводника составляет 700 МПа, проводника в металлической оплетке – 500 МПа, проводника с остатками полимера – 600 МПа.

Микроструктура алюминиевых проводников представлена на рисунке 4.



a, б – исходные (1А); *в, г* – в металлической оплетке (2А); *д, е* – с остатками полимера (3А)

Рисунок 3. – Микроструктура алюминиевых проводников, x100, x500

Алюминиевые проводники (рис. 4) в исходном состоянии (1А) имеют мелкозернистую микроструктуру с размером зерна 2–5 мкм (средний 4 мкм). На участке металлического

кожуха (2А) и с остатками полимера (3А) наблюдается зональная перекристаллизация, связанная с частичным оплавлением проводников. Присутствуют участки с увеличением размера зерна до 30 мкм (2А) и до 15 мкм (3А). В зонах перекристаллизации микротвердость уменьшается до 300 МПа по сравнению с исходной микротвердостью 400–450 МПа.

Заключение

Результаты исследования показали, что тепловое воздействие пламени оказывает значительное влияние на микроструктуру токоведущих жил кабельных изделий, а защитная оболочка, оплетка, броня кабеля в течение некоторого времени защищают жилы от температурного воздействия, задерживают процессы рекристаллизации, перекристаллизации и оплавления. Рекристаллизация и перекристаллизация зерен проводников может являться признаком ВКЗ. При этом микротвердость в зонах рекристаллизации понижается до 40–50 %, что объясняется разупрочняющими процессами, происходящими в кабеле при воздействии температуры пламени. Зоны перекристаллизации свидетельствуют о частичном оплавлении проводников.

Результаты экспериментов подтверждают важность учета конструктивных особенностей кабельных изделий при проведении пожарно-технических экспертиз. Изучение микроструктурных изменений проводников позволяет не только выявлять зоны воздействия пламени, но и дифференцировать их характер (ПКЗ или ВКЗ).

Представляет практический интерес влияние газообразных факторов пожара на изменение микроструктуры и микротвердости токоведущих жил многожильных кабельных изделий сложной конструкции. Дальнейшее совершенствование методик микроструктурного анализа позволит обеспечить более глубокое понимание процессов, происходящих в кабельных изделиях в условиях пожара, а также повысить точность дифференцирования момента возникновения короткого замыкания при проведении пожарно-технических экспертиз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспертное исследование после пожара медных проводников: методические рекомендации / А.Ю. Мокряк [и др.]. – СПб.: СПб. УГПС МЧС России, 2019. – 149 с. – EDN: HJXXJU.
2. Смелков, Г.И. Пожарная безопасность электропроводок / Г.И. Смелков. – М.: ООО «КАБЕЛЬ», 2009. – 328 с.
3. Hagemuer, W. Die metallographische Untersuchung von Kupferleitern als Method zur Unterscheidung zwischen primären und sekundären Kurzschlüssen / W. Hagemuer // Schriftenreihe der Deutsch Volkspolizei. – 1963. – № 7–12. – S. 1160–1170.
4. Митричев, Л.С. Исследование медных и алюминиевых проводников в зонах короткого замыкания и термического воздействия: метод. рекомендации / Л.С. Митричев, А.И. Колмаков, Б.В. Степанов. – М.: ВНИИ МВД СССР, 1986. – 43 с.
5. Смелков, Г.И. Методы определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах / Г.И. Смелков, А.А. Александров, В.А. Пехотиков. – М.: Стройиздат, 1980. – 59 с.
6. Чешко, И.Д. Технические основы расследования пожаров: метод. пособие / И.Д. Чешко. – М.: ВНИИПО, 2002. – 330 с.
7. Чешко, И.Д. Эволюция методики определения первичности-вторичности оплавлений медных проводников, вызванных коротким замыканием / И.Д. Чешко, А.Ю. Мокряк, А.В. Мокряк. – Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2018. – № 3. – С. 39–45. – EDN: YKVZYT.
8. Каргапольцева, Е.В. Проблемы исследования зон оплавлений алюминиевых проводников методами элементного анализа при производстве пожарно-технической экспертизы / Е.В. Каргапольцева, А.А. Шеков. – Актуальные проблемы безопасности в техносфере. – 2024. – № 1 (13). – С 18–21. – DOI: 10.34987/2712-9233.2024.63.22.004. – EDN: NNSMIH.
9. Таубкин, И.С. О надежности методики установления причинной связи токовой перегрузки электропроводки с возникновением пожара / И.С. Таубкин, А.Р. Саклантй. – Теория и практика

- судебной экспертизы. – 2019. – № 1 (14). – С. 106–115. – DOI: 10.30764/1819-2785-2019-14-1-106-115. – EDN: ZRYDAQ.
10. Ильющенко, А.Ф. Структура алюминиевых проводников с оплавлениями для определения момента возникновения короткого замыкания при проведении пожарно-технических экспертиз / А.Ф. Ильющенко, И.В. Фомихина, В.М. Юнчиц. – Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2 (32). – С. 110–117. – EDN: WCNSDV.
11. Громов, В.Н. Исследование расположения дендритных структур в оплавлениях медных проводников токами первичного короткого замыкания в экспертизе / В.Н. Громов, М.А. Галишев, Т.П. Сысоева. Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 2013. – № 3. – С. 1–7. – EDN: RSMMEB.

**Изменение микроструктуры металлических элементов многожильных
кабельных изделий при воздействии пламени**

**Changes in the microstructure of metallic elements of multi-core cable
products when exposed to flame**

Аушев Игорь Юрьевич

кандидат технических 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: ai@ucp.by
SPIN-код: 2558-7937

Igor Yu. Aushev

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,
Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: ai@ucp.by
ORCID: 0000-0003-4425-2085
ScopusID: 57614157700

Фомихина Ирина Викторовна

доктор технических наук,
доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности, профессор
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, Беларусь, г. Минск
Email: ivfom@tut.by
SPIN-код: 5660-6815

Irina V. Fomikhina

Grand 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, Belarus, Minsk
Email: ivfom@tut.by
ORCID: 0009-0007-2164-412X
ScopusID: 6507443284

Веренич Евгений Владимирович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», учебно-методический
центр, методист
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Evgeniy V. Verenich

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Educational and Methodological Center,
Methodist
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

Рыжов Максим Эрнестович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
техносферной безопасности, курсант
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

Maksim E. Ryzhov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Technosphere Safety, cadet
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

CHANGES IN THE MICROSTRUCTURE OF METALLIC ELEMENTS OF MULTI-CORE CABLE PRODUCTS EXPOSED TO FLAME

Aushev I.Yu., Fomikhina I.V., Verenich E.V., Ryzhov M.E.

Purpose. To determine the microhardness and changes in the microstructure of metal elements of multi-core cable products with aluminum and copper cores when exposed to flame.

Methods. Metallography, durometry, as well as general scientific research methods: analysis, synthesis, comparison and generalization.

Findings. The microstructure, dimensions and microhardness of grains of copper and aluminum metal elements of cable products after exposure to flame were determined.

Application field of research. The research results can be used in training specialists in the field of emergency prevention and response, as well as in conducting fire-technical expertise during the investigation of fire causes.

Keywords: cable products, emergency operation mode, microstructure, microhardness, fire investigation.

(The date of submitting: January 15, 2025)

REFERENCES

1. Mokryak A.Yu., Cheshko I.D., Pariyskaya A.Yu., Plotnikov V.G., Skodtaev S.V., Mokryak A.V. *Ekspertnoe issledovanie posle pozhara mednykh provodnikov: metodicheskie rekomendatsii* [Expert examination of copper conductors after a fire: methodological recommendations]. Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia, 2019. 149 p. (rus). EDN: HJXXJU.
2. Smelkov G.I. *Pozharnaya bezopasnost' elektroprovodok* [Fire safety of electrical wiring]. Moscow: Kabel', 2009. 328 p. (rus)
3. Hagemuer W. Die metallographische Untersuchung von Kupferleiternals Method zur Untercheidung-zwischenprimaren und sekundaren Kurzschlussen. *Schriftenreihe der Deutsch Volkspolizei*, 1963. No. 7–12. S. 1160–1170.
4. Mitrichev L.S., Kolmakov A.I., Stepanov B.V. *Issledovanie mednykh i alyuminievykh provodnikov v zonakh korotkogo замыкания и termicheskogo vozdeystviya*: [Study of copper and aluminum conductors in short-circuit and thermal impact zones]: methodical recommendations. Moscow: All-Russian Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1986. 43 p. (rus)
5. Smelkov G.I., Aleksandrov A.A., Pekhotikov V.A. *Metody opredeleniya prichasnosti k pozharam avarinykh rezhimov v elektrotekhnicheskikh ustroystvakh* [Methods for determining the involvement of emergency modes in electrical devices in fires]. Moscow: Stroyizdat, 1980. 59 p. (rus)
6. Cheshko I.D. *Tekhnicheskie osnovy rassledovaniya pozharov* [Technical fundamentals of fire investigation]: methodological manual. Moscow: VNIPO EMERCOM of Russia, 2002. 330 p. (rus)
7. Cheshko I.D., Mokryak A.Yu., Mokryak A.V. Evolyutsiya metodiki opredeleniya pervichnosti-vtorichnosti oplavleniy mednykh provodnikov, vyzvannykh korotkim замыканием [Evolution of the methodology of distinguishing «victim» from «cause» beads of copper conductors by short circuit]. *Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2018. No. 3. Pp. 39–45. (rus). EDN: YKVZYT.
8. Karapol'tseva E.V., Shekov A.A. Problemy issledovaniya zon oplavleniy alyuminievykh provodnikov metodami elementnogo analiza pri proizvodstve pozharno-tekhnicheskoy ekspertizy [Problems of studying melt zones of aluminum conductors using elemental analysis methods during fire-technical examination]. *Actual problems of safety in the technosphere*, 2024. No. 1 (13). Pp. 18–21. (rus). DOI: 10.34987/2712-9233.2024.63.22.004. – EDN: NNSMIH.
9. Taubkin I.S., Saklantiy A.R. O nadezhnosti metodiki ustanovleniya prichinnoy svyazi tokovoy peregruzki elektroprovodki s vzniknoveniem pozhara [Reliability of the method for establishing causation between electrical circuit overload and fire ignition]. *Theory and Practice of Forensic Science*, 2019. Vol. 14, No. 1. Pp. 106–115. (rus). DOI: 10.30764/1819-2785-2019-14-1-106-115. EDN: ZRYDAQ.
10. Il'yushchenko A.F., Fomikhina I.V., Yunchits V.M. Struktura alyuminievykh provodnikov s oplavleniyami dlya opredeleniya momenta vzniknoveniya korotkogo замыкания при provedenii pozharno-tekhnicheskikh ekspertiz [Structure of melted aluminum conductors for determining the moment of occurrence of a short circuit during fire-technical examinations]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2012. Vol. 32, No 2, Pp. 110–117. (rus). EDN: WCNSDV.

11. Goromov V.N., Galishev M.A., Sysoeva T.P. Issledovanie raspolozheniya dendritnykh struktur v oplavleniyakh mednykh provodnikov tokami pervichnogo korotkogo zamykaniya v ekspertize [Study of the location of the dendritic structures in the reflow of copper conductors of the primary short-circuit currents in the examination]. *Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2012. No 3. Pp. 1–7. (rus). EDN: RSMMEB.

Copyright © 2025 Aushev I.Yu., Fomikhina I.V., Verenich E.V., Ryzhov M.E.

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕГРАЦИИ ПРОЕКТНОГО МЕНЕДЖМЕНТА В УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Крецу Р.М., Рыбаков А.В.

Цель. Данное исследование направлено на разработку методических основ интеграции проектного управления в управление рисками техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) на производственных объектах с целью обеспечения устойчивого развития производственного предприятия.

Методы. В рамках исследования проведено сравнение традиционного подхода управления на основе нормативных правовых актов (НПА) и методов проектного управления. Выявлены существенные преимущества проектного подхода, включая гибкость, возможность адаптации мер к изменяющимся условиям. Использовались методологии проектного управления, обеспечивающие систематическую разработку, внедрение и мониторинг защитных мер. Особое внимание уделялось учету жизненного цикла защитных мер, охватывающего этапы проектирования, внедрения, эксплуатации, актуализации и утилизации.

Результаты. В статье излагается разработанный подход к интеграции проектного управления в управление рисками ЧС, включающий алгоритм жизненного цикла защитных мер, классификацию мер по уровню результативности и остаточного риска, а также применение энтропийного анализа для количественной оценки результативности мер. В статье приведена классификация проектов защитных мероприятий, основанная на ожидаемой результативности, уровне риска и остаточной вероятности реализации риска. Этот подход систематизирует управление проектами и улучшает планирование мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций. Интеграция проектного управления в системы управления гражданской обороной и чрезвычайными ситуациями предприятия (ГОиЧС) на объектовом уровне показала преимущества, включая адаптивность, учет долгосрочных результатов и использование современных методов анализа рисков. Полученные результаты подтверждают, что проектный подход повышает эффективность управления рисками и устойчивость систем к техногенным угрозам.

Область применения исследований. Разработанные методы применимы на предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) для управления рисками и повышения устойчивости объектов ТЭК, на промышленных предприятиях – для предотвращения техногенных рисков. Государственные структуры могут использовать их для разработки нормативных актов, а образовательные учреждения – для подготовки специалистов по безопасности и управлению проектами.

Ключевые слова: безопасность, чрезвычайные ситуации, риск-менеджмент, управление проектами, техногенные катастрофы, жизненный цикл защитных мер, предупреждение аварий.

(Поступила в редакцию 13 января 2025 г.)

Введение

Современные предприятия ТЭК сталкиваются с возрастающими требованиями к эффективности, устойчивости и безопасности своих операций. Эти требования обусловлены как глобальными вызовами, такими как изменение климата, цифровизация и энергетический переход, так и локальными факторами, включая нормативные изменения, социальную ответственность бизнеса и необходимость адаптации к экономическим кризисам.

Анализ статистических данных за период с 2019 по 2023 г. показывает, что количество техногенных ЧС остается на высоком уровне, без явной тенденции к снижению (рис. 1). При этом значительные колебания в численности погибших подчеркивают необходимость внедрения эффективных методов управления рисками. В условиях нестабильности показателей необходимо совершенствовать подходы к управлению рисками, что критически важно

для повышения эффективности системы безопасности на всех уровнях. Это подтверждает актуальность интеграции проектного менеджмента в процессы управления рисками ЧС как инструмента системного планирования, контроля и координации мероприятий по снижению угроз аварийности и минимизации их последствий. Проектный менеджмент позволяет внедрять комплексные стратегии управления рисками, обеспечивая адаптивность и оперативность реагирования на потенциальные ЧС.

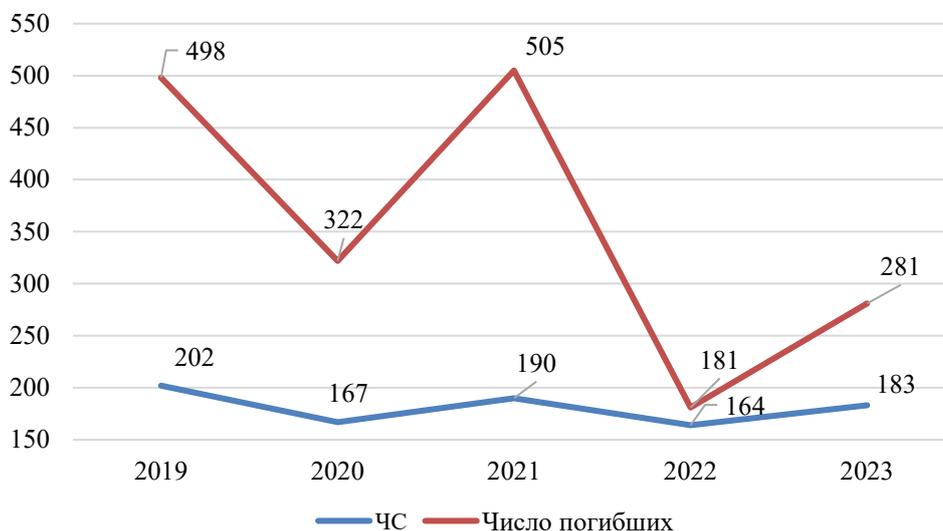


Рисунок 1. – Данные по количеству техногенных ЧС и числу погибших за период 2019–2023 гг.¹

ТЭК России является одной из наиболее стратегически значимых отраслей, обеспечивающих энергоснабжение страны и поддержание экономической стабильности. Однако высокая степень технологической сложности, эксплуатация опасных производственных объектов и значительные масштабы деятельности делают отрасль подверженной различным видам аварий и ЧС.

За последние годы наблюдается нестабильная динамика аварийности и травматизма в ведущих компаниях ТЭК, таких как «Норильский Никель», «Газпром», «Роснефть» и «Лукойл» (табл. 1). Масштабные аварии приводят к серьезным экономическим потерям, ущербу экологии и угрозе жизни сотрудников. В связи с этим актуальность выработки эффективных методов управления рисками становится одной из ключевых задач.

Таблица 1. – Характеристика аварийности и травматизма в компаниях ТЭК

№	Компания	Характеристика аварийности и травматизма	Негативные тенденции и связь с ЧС в контексте статьи
1	Газпром	<ul style="list-style-type: none"> – Увеличение коэффициента травматизма (TRIR²) на 44,2 % в 2023 г. – Рост коэффициента тяжести травм (76,62 в 2023 г. против 67,87 в 2022 г.). – Критический рост смертельного травматизма (FAR³) на 66,4 %. – В нефтяном бизнесе FAR – 12,309 (в 6 раз выше, чем в газовом сегменте) 	<ul style="list-style-type: none"> – Отсутствие эффективной системы управления рисками. – Слабый контроль за подрядными организациями. – Дисбаланс между сегментами компании. – Требуется унификация стандартов безопасности и внедрение проектного управления для снижения аварийных рисков

¹ Составлено на основе данных Государственных докладов о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за период 2019–2023 гг.

² TRIR (Total Recordable Incident Rate) – общий коэффициент регистрируемых происшествий

³ FAR (Fatal Accident Rate) – отношение общего количества погибших работников компании в результате несчастных случаев на производстве к 100 млн отработанных человеко-часов.

Продолжение таблицы 1

№	Компания	Характеристика аварийности и травматизма	Негативные тенденции и связь с ЧС в контексте статьи
2	Лукойл	<ul style="list-style-type: none"> – Число несчастных случаев остается стабильно высоким (21 в 2023 г.). – Рост смертельных случаев (до 2 в 2023 г.). – В подрядных организациях снижение несчастных случаев (с 15 до 12) и пострадавших (с 17 до 13). – Высокая доля бытовых происшествий (37 % падений на ровной поверхности) 	<ul style="list-style-type: none"> – Высокая доля бытовых травм указывает на недооценку повседневных рисков. – Требуется усиление системы мониторинга и внедрение проактивных методов управления безопасностью
3	Роснефть	<ul style="list-style-type: none"> – Рост частоты производственных травм (TRIR) и смертельных случаев (FAR). – Высокие показатели травматизма в подрядных организациях. – В 2023 г. отмечается увеличение пострадавших с временной потерей трудоспособности 	<ul style="list-style-type: none"> – Слабый контроль за подрядчиками. – Недостаточная эффективность превентивных мер. – Требуется пересмотр системы управления критическими рисками и усиление контроля над подрядными работами
4	Норильский Никель	<ul style="list-style-type: none"> – Количество несчастных случаев выросло с 53 в 2021 г. до 83 в 2023 г. – Показатель частоты травматизма (LTIFR) увеличился с 0,38 в 2021 г. до 0,65 в 2023 г. – Количество смертельных несчастных случаев в 2023 г. снова возросло по сравнению с 2022 и составило 5 таких травм 	<ul style="list-style-type: none"> – Рост смертельных случаев указывает на недостаточную эффективность текущих мер безопасности. – Требуется пересмотр стратегии управления рисками, особенно в сегментах с высокой опасностью производства

Анализ динамики аварийности и травматизма в крупнейших компаниях ТЭК России демонстрирует, что, несмотря на действующие системы безопасности, уровень производственного травматизма и число смертельных случаев остаются высокими, а в отдельных секторах наблюдается их рост.

В условиях возрастающей сложности и взаимозависимости процессов риск-менеджмент становится одним из ключевых элементов устойчивого развития предприятий ТЭК. Однако традиционные подходы к управлению рисками часто не обеспечивают необходимого уровня гибкости и адаптивности.

Одним из ключевых инструментов эффективного управления рисками техногенных чрезвычайных ситуаций является интеграция проектного подхода в систему объектового управления рисками ЧС. Внедрение проектного управления позволяет систематизировать процессы идентификации, оценки и минимизации критических рисков, обеспечивая проактивное управление аварийностью и снижение вероятности крупных ЧС.

Одним из инструментов интеграции проектного управления в систему управления рисками техногенных ЧС является анализ и предотвращение сценариев крупных аварий. Так, разлив 21,2 тыс. тонн дизельного топлива на ТЭЦ-3 в Норильске (2020), вызванный просадкой свайного основания, мог быть предотвращен при системном мониторинге инфраструктуры в рамках проектного управления. Разлив мазута в Анапе (2024), связанный с повреждением танкеров в штормовых условиях, демонстрирует необходимость включения климатических рисков в прогнозные модели управления. Эти случаи подтверждают, что внедрение проектных решений в управление техногенными рисками ТЭК позволяет не только минимизировать последствия аварий, но и предотвращать их на ранних этапах.

Целью настоящего исследования является разработка методических основ к управлению производственной безопасностью на объектовом уровне с акцентом на минимизацию рисков техногенных чрезвычайных ситуаций в целях предупреждения техногенных катастроф. Для достижения этой цели сформулированы следующие задачи:

1) провести теоретическое исследование подходов проектного управления и анализа критических рисков, выявить их методологические преимущества и возможности применения для управления рисками чрезвычайных ситуаций;

2) разработать и формализовать систему классификации защитных мер на основе их результативности, уровня остаточного риска и жизненного цикла, с учетом интеграции проектного управления и современных аналитических инструментов;

3) адаптировать подход проектного управления к жизненному циклу каждой защитной меры как отдельного проекта, что позволяет применять инструменты проектного управления, такие как разработка временных и ресурсных планов, контроль реализации, анализ эффективности и адаптация решений и введение концепции жизненного цикла защитной меры, охватывающего этапы разработки, внедрения, мониторинга, актуализации и утилизации, что обеспечивает актуальность и функциональность системы управления в изменяющихся условиях.

Реализация предложенного подхода направлена на повышение устойчивости систем управления рисками, создание динамичных и адаптивных процессов обеспечения безопасности, а также значительное снижение вероятности и последствий техногенных катастроф.

Проектное управление, активно развивающееся в последние десятилетия, демонстрирует значительный потенциал для улучшения систем риск-менеджмента. Использование современных проектных методик позволяет не только оптимизировать управление рисками, но и повысить устойчивость предприятий к чрезвычайным ситуациям. Внедрение этих подходов является важным шагом на пути к формированию более устойчивых и безопасных систем управления.

Проектное управление является признанным инструментом для планирования, организации и контроля процессов в условиях ограниченных ресурсов и жестких временных рамок. В контексте ТЭК проектное управление позволяет:

1) эффективно координировать сложные и масштабные проекты, такие как строительство энергоблоков, модернизация инфраструктуры и разработка месторождений;

2) уменьшать вероятность сбоев в поставках, повышать безопасность и минимизировать воздействие на окружающую среду;

3) способствовать интеграции новых технологий и инноваций в процессы управления [1].

Риск-менеджмент, в свою очередь, позволяет предприятиям ТЭК:

1) выявлять, анализировать и управлять рисками, связанными с опасностями производственных процессов и внешних факторов опасности;

2) повышать устойчивость к техногенным и природным чрезвычайным ситуациям;

3) обеспечивать соответствие нормативным требованиям и ожиданиям учредителей, акционеров и других заинтересованных лиц [2].

Интеграция проектного управления и риск-менеджмента в контексте управления техногенными рисками становится особенно актуальной в условиях увеличивающегося числа кризисов и нестабильности, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к управлению на предприятиях ТЭК.

Несмотря на важность и значимость риск-менеджмента, многие предприятия ТЭК сталкиваются с рядом проблем в его реализации. Ключевые из них включают:

1) фрагментацию управления рисками: отсутствие единого подхода к управлению рисками на уровне предприятия затрудняет координацию между подразделениями;

2) недостаток интеграции новых подходов/технологий: традиционные методы часто не учитывают возможности современных цифровых инструментов, таких как искусственный интеллект и аналитика больших данных, для прогнозирования и управления рисками [3].

3) ограниченные ресурсы: управление рисками часто недооценивается на уровне стратегического планирования, что приводит к недостаточному финансированию и нехватке компетенций среди сотрудников;

4) реактивный подход: системы риск-менеджмента в контексте предупреждения ЧС нередко нацелены на реагирование и устранение последствий, а не на их предотвращение.

Эти проблемы подчеркивают необходимость обновления и модернизации существующих систем управления рисками. Интеграция подходов проектного управления, с их ориентацией на гибкость, адаптивность и стратегическое планирование, может стать ключевым решением для преодоления этих вызовов.

Основная часть

Ограничения нормативного подхода к управлению рисками ЧС на объектовом уровне: переход к проектному управлению. В большинстве случаев управление рисками ЧС на объектовом уровне строится на основе требований НПА, таких как Федеральный закон № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»⁴ и постановление Правительства РФ № 794⁵. Эти документы формируют базовые требования к реализации мероприятий, направленных на снижение рисков и реагирование на ЧС. Однако существующая система управления на основе НПА имеет значительные ограничения, которые снижают ее эффективность и результативность.

Прежде всего, подход, предписанный НПА, в основном ориентирован на реагирующие меры, такие как ликвидация последствий ЧС, в то время как предупреждающие меры получают недостаточное внимание. Это приводит к тому, что ресурсы часто расходуются на устранение последствий, а не на предотвращение самих инцидентов. Кроме того, нормативные требования имеют строгий характер, что ограничивает возможность адаптации мер под конкретные условия объектов или изменения внешней среды. В результате управление рисками становится менее гибким, что делает систему управления уязвимой в условиях динамичных изменений.

В противоположность этому проектное управление предлагает принципиально другой подход, акцентируя внимание на гибкости, адаптивности и долгосрочной результативности защитных мер. Современные методологии проектного управления, такие как Agile, Lean и Critical Control Management (CCM) [4], обеспечивают возможность планировать и реализовывать защитные меры в соответствии с актуальными условиями. Они позволяют приоритизировать риски, эффективно распределять ресурсы и внедрять инновационные технологии. Одной из ключевых особенностей проектного управления является учет полного жизненного цикла защитных мер, начиная от их проектирования и заканчивая актуализацией или утилизацией, что повышает устойчивость системы управления (табл. 2).

Таблица 2. – Сравнение подходов к управлению мерами и мероприятиями на основе требований НПА в области ГОиЧС и проектного управления

Критерий	Подход ГОиЧС (на основе НПА)	Проектное управление
Цель управления мерами	Профилактика и минимизация последствий ЧС техногенного характера в соответствии с нормативными требованиями ⁶	Достижение проектных целей в условиях ограниченных ресурсов, включая улучшение устойчивости и безопасности объектов
Структура управления	Основана на единой государственной системе предупреждения и ликвидации ЧС (РСЧС) с четким распределением ролей и обязанностей между субъектами	Основана на управлении проектами с использованием методов временного, ресурсного и качественного планирования, интеграции процессов
Методология разработки мероприятий	Нормативные требования и методические рекомендации, предписывающие обязательные меры (например, установка систем оповещения, создание планов эвакуации)	Применение гибких и традиционных методов, таких как Agile, Scrum, CCPM, Lean, а также Critical Control Management для интеграции риск-менеджмента в проекты

⁴ О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Федер. закон от 21 дек. 1994 г. № 68-ФЗЖ // КонсультантПлюс. Россия: справ. правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/ (дата обращения: 08.01.2025).

⁵ О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: постановление Правительства Российской Федерации от 30 дек. 2003 г. № 794 // КонсультантПлюс. Россия: справ. правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_45914/ (дата обращения: 08.01.2025).

⁶ См. сноску 4.

Продолжение таблицы 2

Критерий	Подход ГОиЧС (на основе НПА)	Проектное управление
Мониторинг и контроль	Ежегодные проверки готовности объектов и систем к ЧС, контроль за выполнением предписаний ⁷	Постоянный контроль через системы управления проектами (например, использование КПЭ/КРІ, диаграмм Ганта, инструментов мониторинга выполнения работ)
Приоритеты мер	Акцент на предотвращении наиболее вероятных и значимых рисков в зависимости от их классификации	Приоритет определяется с использованием качественного и количественного анализа рисков, включая их влияние на стоимость и сроки выполнения проекта
Обучение и подготовка персонала	Регулярные тренировки и учения, направленные на подготовку к действиям в условиях ЧС (например, эвакуация, работа с системами оповещения)	Повышение квалификации команды проекта, сертификация по стандартам управления проектами (например, РМР) и обучение инструментам анализа рисков и управления (РМІ) [7]
Гибкость подхода	Строго регламентированные процедуры и предписания, что ограничивает адаптивность к быстро меняющимся условиям	Высокая гибкость, возможность адаптации методов и инструментов в зависимости от изменений в проектной среде или возникновения новых рисков
Оценка эффективности мер	Основана на проверке выполнения предписанных мер, регламентированных НПА	Использование количественных и качественных методов оценки (например, анализ КПЭ/КРІ, анализ изменений энтропии системы) для оценки эффективности защитных мер
Жизненный цикл мер	Не учитывается в полной мере. Оценка мер проводится на этапе реализации и после их внедрения без учета этапов обновления и утилизации	Включает все этапы жизненного цикла меры: проектирование, внедрение, эксплуатацию, актуализацию и утилизацию, что обеспечивает долговременную эффективность

Таким образом, интеграция подходов проектного управления в нормативно-правовую систему ГОиЧС на объектовом уровне может существенно улучшить управление рисками на объектовом уровне. Такой подход позволит перейти от формального выполнения предписаний к стратегическому управлению, ориентированному на предотвращение ЧС, минимизацию их последствий и повышение устойчивости объектов.

Идентификация критических рисков. Критические риски в системе управления производственной безопасностью определяются как 20 % угроз, которые могут вызвать существенный или катастрофический ущерб при их реализации. Для их выделения используются методы ранжирования рисков, такие как анализ вероятности и последствий, дополненные качественными подходами. Главным отличием критических рисков является их приоритетное значение, независимо от частоты возникновения. Это требует применения специализированных методик управления, таких как ССМ.

Методика идентификации критических рисков основана на следующих этапах:

- 1) сбор и анализ данных о прошлых инцидентах и потенциальных угрозах;
- 2) ранжирование рисков на основе их потенциальных последствий для производственной безопасности;
- 3) выделение рисков, требующих немедленного внедрения защитных мер.

В горнодобывающей отрасли использование подхода ССМ стало ключевым инструментом для снижения аварийности, связанной с отказами оборудования. В рамках реализации данного подхода была проведена детальная оценка наиболее уязвимых элементов производственного цикла. Например, оборудование с высокой степенью износа или узлы, подвергающиеся частым нагрузкам, были классифицированы как критические точки. На основе

⁷ См. сноску 5.

этого анализа разработаны и внедрены специфические защитные меры, включая автоматизированные системы диагностики и предиктивного технического обслуживания. Эти меры позволили не только сократить частоту отказов, но и улучшить общую устойчивость системы за счет оперативного обнаружения неисправностей и предупреждения аварийных ситуаций.

Адаптация подхода Critical Control Management (CCM). CCM представляет собой системный подход к управлению критическими рисками, который включает проектирование, внедрение и мониторинг защитных мер. Основные элементы адаптации CCM к условиям ТЭК:

- определение критических мер защиты: защита от конкретных угроз, например, технологических аварий или утечек вредных веществ;
- внедрение систем мониторинга: применение цифровых технологий для отслеживания состояния защитных мер и предотвращения их деградации;
- обучение персонала: обеспечение готовности сотрудников к использованию инструментов CCM и внедренных защитных мер.

Введение концепции жизненного цикла защитных мер. Жизненный цикл защитной меры охватывает все этапы ее существования:

- проектирование: разработка мер с учетом специфики выявленных рисков;
- внедрение: реализация мер, включая установку оборудования или изменение технологических процессов;
- эксплуатация и мониторинг: обеспечение функционирования мер, проведение регулярных проверок и технического обслуживания;
- актуализация: пересмотр и модернизация мер в зависимости от изменения условий и появления новых технологий;
- утилизация: завершение использования устаревших мер и их замена новыми.

Использование концепции жизненного цикла в управлении аварийными системами на нефтеперерабатывающих заводах является наглядной демонстрацией эффективности данного подхода. В рамках проведенных исследований в работе [6] на предприятиях отрасли была реализована стратегия, включающая систематический мониторинг, модернизацию и адаптацию аварийного оборудования. Ключевыми этапами стали оценка состояния оборудования, идентификация критических узлов, подверженных наибольшим нагрузкам, и внедрение автоматизированных систем диагностики. Например, на одном из крупных нефтеперерабатывающих заводов была внедрена предиктивная аналитика, основанная на сборе данных о вибрациях, температуре и давлении в реальном времени. Эти данные анализировались с помощью алгоритмов машинного обучения, что позволило своевременно выявлять признаки износа и предотвращать выход оборудования из строя. В результате частота аварийных внеплановых остановок снизилась на 30 %, а затраты на устранение последствий инцидентов сократились на 25 %. Эти меры не только повысили уровень безопасности, но и улучшили экономическую эффективность эксплуатации оборудования.

Применение инструментов проектного управления. Каждая защитная мера (или их совокупность) рассматривается как отдельный проект, что позволяет использовать инструменты проектного управления, включая:

- разработку временных и ресурсных планов: установление сроков реализации мер и распределение ресурсов;
- контроль выполнения: мониторинг ключевых этапов внедрения и эксплуатации защитных мер;
- оценку эффективности: проведение анализа результативности мер на основе ключевых показателей производительности (KPIs).

Для обеспечения системного и целостного управления защитными мерами важно рассматривать их жизненный цикл как последовательность этапов в рамках проектного подхода. Это не только упрощает структуризацию мероприятий, но и позволяет интегрировать

современные аналитические инструменты, такие как энтропийный анализ и количественная оценка рисков, на каждом из этапов. В таблице 3 описаны ключевые стадии жизненного цикла защитных мер, основные действия, которые необходимо выполнить, а также параметры и расчетные формулы для оценки эффективности. Такой подход создает условия для оптимального планирования и реализации мер, что в итоге способствует снижению вероятности и последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Таблица 3. – Этапы жизненного цикла защитных мер: интеграция проектного управления и энтропийного анализа

Этап жизненного цикла	Действия на этапе	Что учитывать	Что рассчитывать	Показатели и формулы расчета
1. Инициация	Определение критических рисков и приоритетов, энтропийный анализ критических рисков [7]	– Критичность рисков. – Энтропия системы	– Энтропия текущего состояния. – Уровень неопределенности	$H(x) = -\sum p(x)\log_2 p(x)$, где $H(x)$ – энтропия системы, $p(x)$ – вероятность события
	Выделение целей защитных мер	Возможности реализации/внедрения проекта	Оценка ресурсов для внедрения	
2. Планирование	– Разработка проектного плана для каждой меры. – Определение ключевых параметров выполнения	– Бюджет. – Планируемая результативность мер. – Планируемый уровень риска	– Планируемая результативность защитных мер. – Уровень снижения риска	$R_{\text{post}} = R_{\text{pre}}(1 - E_{\text{measure}})$, где R_{post} – планируемый риск по результату внедрения проекта, R_{pre} – исходный риск, E_{measure} – результативность защитной меры
	Формирование временных и ресурсных планов	– Объем работ. – Сроки выполнения	– Требуемые ресурсы и их доступность. – Соотношение ожидаемого результата и затрат	
3. Внедрение	– Реализация запланированных мер. – Установка оборудования, внедрение процедур	– Текущие затраты. – Соблюдение сроков	– Промежуточные результаты. – Фактическая эффективность мер η , [млн руб.] ⁻¹	$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i$, где C_i – затраты на внедрение конкретной меры. $\eta = (P_0 - P_1) / C_{\text{total}}$, где P_0 – исходная вероятность аварии, P_1 – вероятность аварии после внедрения проекта
	Мониторинг выполнения задач	– Актуальность плана. – Сравнение с исходными метриками	Расхождение фактических и планируемых данных	
4. Эксплуатация	– Оценка функционирования мер в реальных условиях. – Тестирование эффективности защитных мер	– Работоспособность. – Остаточный риск	– Остаточная энтропия системы. – Остаточные риски. – Долговременная эффективность	$\Delta H = H_{\text{initial}} - H_{\text{current}}$, где ΔH – изменение энтропии
	Анализ мониторинговых данных	– Сбор данных. – Поведение системы	Поддержание результативности мер в рамках планируемого периода эксплуатации	

Продолжение таблицы 2

Этап жизненного цикла	Действия на этапе	Что учитывать	Что рассчитывать	Показатели и формулы расчета
5. Актуализация	– Пересмотр мер на основе изменяющихся условий. – Внедрение новых технологий	– Новые риски. – Тренды системы. – Анализ лучших практик, отраслевого опыта	– Сравнение эффективности старых и новых решений. – Актуализированный риск	
	Модернизация оборудования	Стоимость изменений	Соотношение затрат и результатов (уровень снижения рисков ЧС)	
6. Завершение (утилизация)	– Утилизация устаревших мер. – Завершение проекта	Финальная оценка результата: снижение результативности; наличие альтернативных защитных мер высокой результативности	– Конечная энтропия системы. – Общая эффективность проекта. – Сопоставление затрат и экономии. – Возврат на инвестиции (ROI)	$E = (R_{pre} - R_{post}) \cdot D_{average}$, где E – экономия, $D_{average}$ – средний ущерб от аварии. $ROI = (E / C_{total}) \cdot 100 \%$

Таким образом, системное применение подходов проектного управления в сочетании с ССМ создает условия для повышения устойчивости систем управления рисками и минимизации последствий техногенных катастроф.

Внедрение защитных мер и мероприятий для минимизации техногенных рисков требует четкого и структурированного подхода, особенно на уровне сложных производственных объектов. Одним из ключевых инструментов управления такими проектами является их категоризация, основанная на ожидаемой результативности, уровне риска и остаточной вероятности реализации опасности. Это позволяет систематизировать процесс выбора и реализации мер, делая его более прозрачным, приоритетным и адаптированным к специфике объектов.

Современные системы управления рисками, включая нормативно-правовые и проектные подходы, часто сталкиваются с проблемой правильного распределения ресурсов и фокусировки на наиболее значимых угрозах. Категоризация проектов играет важную роль в решении этих задач, предоставляя инструмент для обоснованного и целенаправленного планирования. Она способствует созданию комплексного и гибкого механизма управления, который охватывает как стратегические, так и оперативные аспекты. Важно подчеркнуть, что такая классификация помогает обеспечить баланс между результативностью мер, их стоимостью и уровнем оставшихся рисков, структура категоризации проектов приведена в таблице 4.

Таблица 4. – Структура проектов защитных мероприятий: категории, риски и результативность

Категория	Описание проекта	Ожидаемая результативность	Остаточная вероятность реализации опасности
I	Проекты полной элиминации рисков, включая замену оборудования или технологий, полностью исключая источник опасности	Высокая (>0,9)	Почти нулевая (~0,1)
II	Проекты, включающие конструктивные изменения, способные минимизировать риски без изменения основных процессов	Высокая (0,7–0,9)	Низкая (0,2–0,3)
III	Проекты внедрения систем предупреждения и информирования, направленные на уменьшение вероятности и последствий аварий через информационную поддержку	Средняя (0,6–0,7)	Умеренная (0,3–0,4)
IV	Образовательные проекты и проекты повышения квалификации, включая тренинги, семинары и сертификации для персонала	Средняя (0,5–0,6)	Заметная (0,4–0,5)
V	Проекты реагирования на ЧС, включая разработку и реализацию планов ликвидации последствий и проекты установки временных защитных сооружений	Низкая (0,1–0,2)	Высокая (0,8–0,9)

Такая категоризация проектов, направленных на реализацию защитных мер и мероприятий, имеет значительную практическую значимость и обеспечивает качественное улучшение управления рисками техногенного характера. В ее основе лежат принципы, позволяющие эффективно распределять ресурсы, прогнозировать результативность мер и учитывать различия в уровнях риска. Основные аргументы в пользу ее применения можно выделить следующим образом.

Приоритизация ресурсов: в условиях ограниченности времени, финансовых и человеческих ресурсов важно сосредоточиться на проектах, способных достичь наибольшего эффекта. Категоризация позволяет выделить наиболее результативные меры (категории I и II), которые имеют высокий потенциал для снижения рисков и устранения опасностей.

Обоснование эффективности решений: классификация предоставляет инструмент для прогнозирования ожидаемой результативности мер и остаточной вероятности реализации опасности. Это позволяет обоснованно выбирать проекты с оптимальным соотношением затрат и ожидаемой выгоды.

Различный подход к уровням риска: меры различаются не только по ожидаемой результативности, но и по уровню остаточного риска. Это позволяет управлять рисками более гибко: например, проекты категории III направлены на снижение умеренного риска, а проекты категории V предназначены для работы с очень высокими рисками.

Системность подхода: классификация охватывает широкий спектр мероприятий – от технологических решений (категория I) до образовательных и организационных мер (категории IV и V). Это способствует формированию комплексного подхода к управлению рисками, включающего как предупреждающие, так и реагирующие меры.

Прозрачность и унификация: наличие четких критериев (ожидаемая результативность, уровень риска, остаточная вероятность опасности) способствует унификации оценки проектов, облегчая процесс планирования и мониторинга их реализации.

Поддержка долгосрочного планирования: категоризация помогает учитывать различия в жизненном цикле защитных мер. Проекты с высокой результативностью и низкой остаточной вероятностью опасности могут быть приоритетны на ранних этапах, тогда как проекты категорий IV и V способствуют повышению устойчивости на долгосрочной основе.

Рассмотрим применение методики интеграции проектного управления рисками на примере аварии в порту Анапы (2024), связанной с разливом мазута из-за повреждения танкеров во время шторма. Авария выявила потенциальные недостатки в подготовке инфраструктуры к экстремальным погодным условиям и возможное отсутствие проактивных мер по снижению рисков.

Поскольку расследование аварии еще в процессе, в рамках анализа предполагается, что для предотвращения аналогичных ЧС могут быть внедрены условные защитные меры, распределенные по категориям результативности. В рамках категории I возможно усиление швартовочных конструкций и модернизация креплений танкеров, что теоретически может снизить вероятность их повреждения при шторме на 90 %. В категории II предполагается внедрение автоматизированной системы штормового мониторинга и плана экстренного перемещения судов, что могло бы уменьшить вероятность столкновений и разгерметизации на 70–90 %. В категории III возможна установка системы экстренного оповещения экипажей, что потенциально снизило бы риск человеческой ошибки на 60–70 %. Проведение обучающих мероприятий для персонала и экипажей в категории IV могло бы повысить скорость реагирования на 50 %, а создание аварийных запасов для быстрого устранения разливов в категории V позволило бы сократить потери при ЧС на 40 % (табл. 5).

В рамках анализа будет проведен расчет предполагаемой эффективности защитных мер с использованием этапов жизненного цикла защитных мероприятий и их категоризации по ожидаемой результативности и остаточному риску (табл. 6). Это позволит оценить, какие меры могут быть эффективны для снижения вероятности аварий, повышения устойчивости

системы и оптимизации затрат на устранение последствий техногенных ЧС. В данном примере представлен расчет эффективности этих мер в соответствии с этапами жизненного цикла защитных мер, описанными в таблице 3.

Таблица 5. – Категоризация защитных мер для предотвращения аналогичных аварий

Категория защитных мер	Предлагаемые меры	Ожидаемая результативность
Категория I «Полное устранение риска»	Запрет эксплуатации судов старше 30 лет. Усиление швартовочных конструкций. Модернизация креплений танкеров	Устранение аварийности на 90 %
Категория II «Минимизация риска конструктивными изменениями»	Автоматизированная система мониторинга штормов. Программа экстренной переброски судов в безопасные зоны	Снижение риска крушений на 70–90 %
Категория III «Информационные и предупреждающие системы»	Усиленный контроль за выполнением предупреждений МЧС. Мониторинг технического состояния судов в реальном времени. Установка системы экстренного оповещения экипажей	Уменьшение влияния человеческого фактора на 60–70 %
Категория IV «Повышение квалификации персонала»	Регулярные тренировки экипажей по реагированию на штормовые условия	Ускорение принятия решений при ЧС на 50 %
Категория V «Меры реагирования на ЧС»	Создание резерва аварийных боновых заграждений и оборудования для сбора нефтепродуктов	Снижение потерь при разливах мазута на 40 %

Таблица 6. – Реализация проекта по этапам жизненного цикла защитных мер

Этап жизненного цикла	Действия на этапе	Что учитывать	Что рассчитывать	Показатели и формулы расчета
1. Инициация	Определение критических рисков и энтропийный анализ системы	Основные риски: – Разгерметизация судов. – Разлив нефтепродуктов. – Низкая готовность к штормовым условиям	– Исходная вероятность аварии (P_0). – Исходная энтропия системы ($H_{initial}$)	$P_0 = 0,3$ (30 %); $H_{initial} = -P_0 \log_2 P_0 - (1 - P_0) \log_2 (1 - P_0) = 0,881$
2. Планирование	Разработка плана внедрения системы управления рисками	– Бюджет на реализацию (C_{total}). – Планируемая результативность ($E_{measure}$)	– Расчет вероятности аварии после внедрения (P_1). – Планируемое снижение энтропии (ΔH)	$P_1 = 0,1$ (10 %); $H_{current} = 0,469$; $\Delta H = H_{initial} - H_{current} = 0,412$
3. Внедрение	Реализация мер защиты	– Мониторинг выполнения задач. – Соблюдение сроков реализации проекта	Коэффициент эффективности внедренных мер η , [млн руб.] ⁻¹	$C_{total} = 2,5$ млн руб.; $\eta = (P_0 - P_1) / C_{total} = 0,08$ [млн руб.] ⁻¹ . Т.е. каждый потраченный 1 млн руб. снижает вероятность аварии на 8 %
4. Эксплуатация	Оценка функционирования мер в реальных условиях	– Анализ устойчивости системы. – Снижение остаточного риска аварий	Оценка результативности внедренных мер ($E_{measure}$)	$E_{measure} = \Delta H / H_{initial} = 0,468$ (46,8 %)
5. Актуализация	Коррекция мер на основе мониторинга	– Новые угрозы. – Данные о частоте ЧС	Актуализированная оценка риска	Снижение аварийности на 40 %
6. Завершение (утилизация)	Завершение проекта и итоговая оценка эффективности	– Финальная оценка результатов. – Сопоставление затрат и экономии	Возврат на инвестиции (ROI)	$ROI = \frac{E}{C_{total}} \cdot 100 \% = \frac{10}{2,5} \cdot 100 \% = 400 \%$

Анализ аварии в порту Анапы (2024) и расчет эффективности внедренных защитных мер показали значительное снижение вероятности подобных инцидентов – с 30 до 10 %, что подтверждает результативность проактивного подхода. Энтропийный анализ зафиксировал уменьшение неопределенности системы на 46,8 %, что свидетельствует о повышении ее управляемости. Экономическая эффективность мероприятий выразилась в сокращении затрат на ликвидацию последствий на 40 %, а коэффициент результативности достиг 46,8 %, подтверждая адаптивность системы безопасности к экстремальным условиям. В результате уровень аварийности в порту снизился в 2 раза, что демонстрирует успешность интеграции проектного управления в процессы минимизации техногенных рисков и подтверждает целесообразность его масштабирования на другие объекты.

Таким образом, предложенная категоризация не только упрощает процесс принятия решений, но и способствует повышению общей устойчивости системы управления рисками за счет целенаправленного и стратегически ориентированного подхода.

Заключение

Статья демонстрирует значительный потенциал интеграции подходов проектного управления и анализа критических рисков в системы управления чрезвычайными ситуациями на объектах ТЭК. Разработанные методические рекомендации позволяют не только структурировать процесс управления рисками, но и повысить результативность и адаптивность реализуемых мер. Категоризация защитных мероприятий по их результативности, уровню остаточного риска и жизненному циклу открывает новые перспективы для повышения устойчивости объектов. Полученные результаты являются основой для дальнейшего развития стратегий управления рисками в условиях динамических изменений внешней среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Orieno, O.H. Sustainability in project management: A comprehensive review. / O.H. Orieno, N.L. Ndubuisi, N.L. Eyo-Udo [et al.] // World Journal of Advanced Research and Reviews. – 2024. – Vol. 21, No. 1. – P. 656–677. – DOI: 10.30574/wjarr.2024.21.1.0060.
2. Aven, T. Risk management and governance: Concepts, guidelines and applications / T. Aven, O. Renn. – Springer, 2010. – 278 p. – DOI: 10.1007/978-3-642-13926-0.
3. Mupa, M.N. The role of enterprise risk management (ERM) in supporting strategic decision-making processes in the energy sector / M.N. Mupa, F.R. Chiganze, T.I. Mporfu [et al.] // Iconic Research and Engineering Journals. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 826–848. – URL: <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1706226.pdf> (accessed: January 8, 2025).
4. Health and Safety Critical Control Management: Good Practice Guide. – International Council on Mining and Metals (ICMM), 2015. – 36 p. – URL: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/health-and-safety/2015/guidance_ccm-good-practice.pdf (accessed: January 8, 2025).
5. PMP® Certification Handbook. – Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2023. – URL: <https://www.pmi.org/certifications/project-management-pmp> (accessed: January 8, 2025).
6. Рыбаков, А.К. Использование предиктивной аналитики в обслуживании насосного оборудования на НПЗ / А.К. Рыбаков // Бурение и нефть. – 2023. – № 7-8. – С. 32–33. – URL: https://burneft.ru/archive/issues/detail.php?ELEMENT_ID=63297 (дата обращения: 08.01.2025). – EDN: INWWUP.
7. Крецу, Р.М. Энтропийный анализ чрезвычайных ситуаций техногенного характера: методология и практическое применение / Р.М. Крецу, А.В. Рыбаков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 4. – С. 451–461. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.451. – EDN: YGDFUJ.

**Методические основы интеграции проектного менеджмента
в управление рисками чрезвычайных ситуаций**

**Methodological basis of the integration of project management
into emergency risk management**

Крецу Ромина Маратовна

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

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

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

SPIN-код: 8973-2818

Romina M. Kretsu

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

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

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

Рыбаков Анатолий Валерьевич

доктор технических наук, профессор

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

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

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

SPIN-код: 8654-3788

Anatoliy V. Rybakov

Grand PhD in Technical Sciences, Professor

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

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

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

ORCID: 0000-0002-4037-1231

METHODOLOGICAL BASIS OF THE INTEGRATION OF PROJECT MANAGEMENT INTO EMERGENCY RISK MANAGEMENT

Kretsu R.M., Rybakov A.V.

Purpose. This research is aimed at the development of methodological foundations for the integration of project management into the management of risks of man-made emergencies at production facilities in order to ensure sustainable development of the production enterprise.

Methods. The study compares the traditional approach of management based on regulatory legal acts (RLA) and project management methods. Significant advantages of the project approach were identified, including flexibility and the ability to adapt measures to changing conditions. Project management methodologies were used to ensure systematic development, implementation and monitoring of protective measures. Particular attention was paid to the life cycle of protective measures, covering the stages of design, implementation, operation, updating and disposal.

Findings. The article presents the developed approach to the integration of project management into emergency risk management, including an algorithm of the life cycle of protective measures, classification of measures by the level of performance and residual risk, as well as the application of entropy analysis for quantitative assessment of the effectiveness of measures. The paper presents a classification of protective measure projects based on expected performance, risk level and residual risk realisation probability. This approach systematises project management and improves the planning of emergency prevention measures. The integration of project management into the systems of civil defence and emergency management at the facility level has shown several advantages including adaptability, consideration of long-term results and use of modern methods of risk analysis. The results obtained confirm that the project approach improves the effectiveness of risk management and the resilience of systems to man-made threats.

Application field of research. The developed methods can be applied in the fuel and energy complex (FEC) enterprises for risk management and enhancing the resilience of FEC facilities, as well as in industrial enterprises for preventing technogenic risks. Governmental bodies can use them for the development of regulatory acts, while educational institutions can utilize them for training specialists in safety and project management.

Keywords: safety, emergencies, risk management, project management, technogenic disasters, life cycle of protective measures, accident prevention.

(The date of submitting: January 13, 2025)

REFERENCES

1. Orieno O.H., Ndubuisi N.L., Eyo-Udo N.L., Ilojiana V.I., Biu P.W. Sustainability in project management: A comprehensive review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2024. Vol. 21, No. 1. Pp. 656–677. DOI: 10.30574/wjarr.2024.21.1.0060.
2. Aven T., Renn O. *Risk management and governance: Concepts, guidelines and applications*. Springer, 2010. 278 p. DOI: 10.1007/978-3-642-13926-0.
3. Mupa M.N., Chiganze F.R., Mpofu T.I., Mubvuta M., Mangeya R. The role of enterprise risk management (ERM) in supporting strategic decision-making processes in the energy sector. *Iconic Research and Engineering Journals*, 2024. Vol. 8, No. 2. P. 826–848. Available at: <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1706226.pdf> (accessed: January 8, 2025).
4. *Health and Safety Critical Control Management: Good Practice Guide*. International Council on Mining and Metals (ICMM), 2015. 36 p. Available at: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/health-and-safety/2015/guidance_ccm-good-practice.pdf (accessed: January 8, 2025).
5. PMP® Certification Handbook. – Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2023. Available at: <https://www.pmi.org/certifications/project-management-pmp> (accessed: January 8, 2025).
6. Rybakov A.K. Ispol'zovanie prediktivnoy analitiki v obsluzhivanii nasosnogo oborudovaniya na NPZ [Using predictive analytics in the maintenance of pumping equipment at refinery]. *Burenie i nefi'*, 2023. No. 7-8. Pp. 32–33. (rus). Available at: https://burneft.ru/archive/issues/detail.php?ELEMENT_ID=63297 (accessed: January 8, 2025). (rus). EDN: INWWUP.

7. Kretsu R.M., Rybakov A.V. Entropiynyy analiz chrezvychaynykh situatsiy tekhnogenogo kharaktera: metodologiya i prakticheskoe primenenie [Entropy analysis of technogenic emergencies: methodology and practical application]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 4. Pp. 451–461. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.451. EDN: YGDFUJ.

Copyright © 2025 Kretsu R.M., Rybakov A.V.

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

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНА НА ПРИМЕРЕ КУП «ГОРЕЦКИЙ ЭЛЕВАТОР»

Аушев И.Ю., Иванистов А.С.

Цель. Провести анализ взрывобезопасности процесса хранения и переработки зерна, определить характерные для данного объекта аварии и инциденты.

Методы. Общенаучные методы исследования: анализ и синтез, сравнение и обобщение.

Результаты. Определены основные причины взрывов на объектах хранения и переработки зерна.

Область применения исследований. Результаты работы могут быть использованы при подготовке специалистов в сфере предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, промышленной безопасности, в ходе проведения пожарно-профилактических мероприятий.

Ключевые слова: промышленная безопасность, хранение и переработка зерна, пыль, взрыв.

(Поступила в редакцию 22 ноября 2024 г.)

Введение

Зерновая промышленность – это лидирующая отрасль сельского хозяйства в Республике Беларусь. От степени ее развития зависят темпы совершенствования иных отраслей. Зерновые культуры произрастают по всей территории Республики Беларусь, т.к. данный класс растений довольно неприхотлив к климатическим и почвенным критериям и особенностям.

Общая площадь земель, используемая в 2023 г. под посев сельскохозяйственных культур, согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, составила 5756 тыс. га (в сельскохозяйственных организациях – 92 %, крестьянских (фермерских) хозяйствах – 3,7 %, хозяйствах населения – 4,3 %). Зерновыми и зернобобовыми культурами занято чуть более 40 % от общей площади посевов.

Статистические данные свидетельствуют о том, что в 2023 г. при усредненной урожайности 33,2 ц/га было собрано 7,7 млн т зерна (в весе после переработки). Абсолютным лидером в объемах произведенной продукции стала Минская область с урожайностью 1,9 млн т зерна или 24,6 % от общего объема производства в стране¹.

Государственной программой «Аграрный бизнес» на 2021–2025 гг. предусмотрено наращивание производства растениеводческой продукции для нужд потребительского рынка, обеспечения перерабатывающей промышленности сырьем и создания прочной кормовой базы для общественного животноводства, а также для увеличения экспортных поставок [1].

Таким образом, объекты хранения и переработки зерна являются основой всего сельскохозяйственного производства. Значимость данного производства обусловлена необходимостью обеспечения промышленного комплекса Республики Беларусь сырьевой базой, а населения – качественными продуктами питания.

Основная часть

Процесс хранения и переработки зерна приводит к образованию значительных объемов мелкодисперсной пыли на объектах зерновой промышленности. Это создает условия для

¹ Производство продукции растениеводства в 2023 году // mshp.gov.by: офиц. сайт Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – 2024. – 25 янв. – URL: <https://mshp.gov.by/ru/news-ru/view/proizvodstvo-produktsii-rastenievodstva-v-2023-godu-9282-2024> (дата обращения: 08.07.2024).

формирования взрывоопасных пылевоздушных смесей в производственных помещениях и установках, а также в системах технологического, транспортного и аспирационного оборудования.

В период становления зерновой отрасли, когда активно возводились сооружения для хранения и переработки зерна, аварии и происшествия на таких объектах были обычным явлением. В 70–80-х гг. прошлого века зафиксировано наибольшее число чрезвычайных ситуаций. Каждый год происходило от 10 до 15 взрывов пыли, что вело к человеческим жертвам и значительным экономическим потерям.

Вопрос обеспечения безопасности на промышленных объектах остается актуальным и в настоящее время. Так, 14 мая 2014 г. на Семейском мукомольно-комбикормовом комбинате произошел взрыв пылевоздушной смеси. Авария произошла во время проведения ремонтных работ на силосных бункерах. В результате резки днища бункера остатки пшеницы и зерновая пыль образовали взрывоопасную смесь. В результате взрыва были повреждены пять соседних силосов, один из которых был полностью уничтожен [2].

На территории Республики Беларусь расположено более 100 крупных промышленных предприятий, в том числе объекты хранения и переработки зерна, где в технологическом процессе обращаются или являются сопровождающим продуктом взрывопожароопасные пыли [3].

17 августа 2022 г. в 1 ч 19 мин поступило сообщение о возникновении пожара в вертикальной шахте сушильного отделения рабочей башни элеватора, расположенного на территории ОАО «Слуцкий комбинат хлебопродуктов» в Слуцке². В результате возгорания была приостановлена сушка зерна на элеваторе, а также повреждено оборудование для теплообмена. Сотрудниками МЧС и работниками хозяйства удалось спасти 90 т ржаного зерна. Технологические процессы на объекте не были нарушены. Пострадавших не зафиксировано.

11 апреля 2023 г. в 19 ч 53 мин поступило сообщение о пожаре на четвертом этаже шестиэтажного железобетонного здания элеватора в Витебске³. В результате пожара повреждены 2 м² транспортерной ленты и 4 м норийных труб. Пострадавших нет. Технологический процесс предприятия не нарушен.

25 августа 2024 г. в 4 ч 29 мин системой автоматической пожарной сигнализации и передачи извещений о чрезвычайных ситуациях «Молния» выявлен пожар в охладительной колонне на пятом этаже пятиэтажного здания комбикормового цеха на территории Слуцкого комбината хлебопродуктов⁴. Как стало известно, происходило тление гранул комбикорма в противопоточном охладителе на втором этаже. Погибших, пострадавших нет. Работа участка производства предстартерных комбикормов приостановлена, технологический процесс предприятия не нарушен.

Прослеживая периодичность возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах зернового производства, можно сделать вывод, что вопросам обеспечения промышленной и пожарной безопасности на вышеуказанных объектах следует уделять особое внимание.

² Информация о чрезвычайных ситуациях № 229 с 06-00 часов 16 августа 2022 г. до 06-00 часов 17 августа 2022 г. // mchs.gov.by: офиц. сайт Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – 2022. – 17 авг. – URL: <https://mchs.gov.by/operativnaya-informatsiya/sutochnye-svodki-mchs/v-rb/397580> (дата обращения: 10.09.2024).

³ Информация о чрезвычайных ситуациях № 102 с 06-00 часов 11 апреля 2023 г. до 06-00 часов 12 апреля 2023 г. // mchs.gov.by: офиц. сайт Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – 2023. – 12 апр. – URL: <https://mchs.gov.by/operativnaya-informatsiya/sutochnye-svodki-mchs/v-rb/418524> (дата обращения: 10.09.2024).

⁴ Информация о чрезвычайных ситуациях № 238 с 06-00 часов 24 августа 2024 г. до 06-00 часов 25 августа 2024 г. // mchs.gov.by: офиц. сайт Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – 2024. – 25 авг. – URL: <https://mchs.gov.by/operativnaya-informatsiya/sutochnye-svodki-mchs/v-rb/459713> (дата обращения: 10.09.2024).

Пыль представляет собой совокупность мельчайших твердых частиц, которые способны находиться в воздухе во взвешенном состоянии. К пылям принято относить мелкодисперсные твердые вещества и материалы, размер частиц которых составляет менее 850 мкм [4].

Принцип принудительного потока представляет собой важную характеристику технологического процесса на предприятиях, занимающихся хранением и переработкой зерна. Это означает, что промежуточные продукты зернового производства циркулируют в замкнутых коммуникационных линиях, проходя через технологическое оборудование. Этот процесс берет свое начало в точке подачи сырья и продолжается вплоть до получения готовой продукции.

Во время выполнения технологических операций на объектах хранения и переработки зерна сырье проходит этапы приемки, очистки, сушки и отпуска, передвигаясь как с помощью транспортных механизмов, так и самотеком. Процесс трения зерновых культур о поверхности технологического и транспортного оборудования, а также взаимное трение отдельных зерен ведет к образованию органической пыли.

В свою очередь, движение зерна образует постоянно меняющуюся, в зависимости от определенных условий, концентрацию пылевоздушной смеси. Данные условия способствуют возникновению взрыва при наличии источника зажигания.

В производственных условиях источниками воспламенения газозвушных и пылевоздушных смесей могут являться [5]: 1) электрическая дуга, пламя газовой горелки, искры, капли расплавленного металла и горячие поверхности конструктивных элементов – при осуществлении электросварочных, газосварочных или иных огневых работ; 2) нагретые поверхности конструкций, искры от механического удара или трения, очаги тления или горения материалов, а также горящие элементы конструкции – в неисправном технологическом или транспортном оборудовании, если в него попадают металлические или другие искрящиеся предметы; искры от дефектного электрического оборудования; 3) зоны самовозгорания сырья и продукции комбикормов; 4) высокотемпературные сушильные агенты для зерна, места возгорания в устройствах для сушки зерна; 5) разряды статического электричества; 6) раскаленные поверхности, пламя или искры от внешних источников (открытое пламя и горячие поверхности осветительных и нагревательных приборов, самовоспламеняющиеся промасленные тряпки, курение и др.).

Первичный взрыв в техническом оборудовании – основная причина возникновения более мощных и разрушительных чрезвычайных происшествий. Отсутствие действенных мер по защите от взрывов при возникновении избыточного давления в эпицентре взрыва может привести к серьезным разрушениям, таким как разрушение конструкций в области взрыва и распространение взрывной волны по всем участкам производства.

Повышение надежности производственного оборудования, совершенствование методов его обслуживания и эксплуатации, внедрение специализированных систем контроля и блокировки, а также использование технических средств для предотвращения взрывов – ключевые меры, направленные на повышение уровня взрывобезопасности предприятий, занимающихся хранением и переработкой зерна. Однако нельзя исключать возможность возникновения взрывов вследствие случайных поломок оборудования или несоблюдения обслуживающим персоналом требований безопасности.

Анализ литературных источников и статистических данных [3–5] показал, что основным местом, где возникает взрыв на вышеуказанных объектах, является силос или бункер (47,7 % всех случаев). Главными факторами, приводящими к взрывам на объектах хранения и переработки зерна, являются: поломки и нарушение правил использования технологического оборудования – 27,7 %, самовозгорание обрабатываемого вещества в силосах и бункерах – 22,5 %, выполнение огневых работ с нарушением предписанных правил – 20 %, поломки и несоблюдение правил использования зерносушильного оборудования – 6,7 %, аварийный режим работы электроустановок – 6,7 %, нарушение общих противопожарных норм – 3,6 %.

Примечательно, что в 12,8 % случаев причину возникновения взрывов установить так и не удалось. Согласно статистическим данным⁵, в зерновой промышленности США наибольшее количество взрывов пыли возникает в ковшовых элеваторах (примерно 64 %) и в силосах (около 17 %).

Рассмотрим различные сценарии возможного взрыва на объектах, где хранится и перерабатывается зерно:

1. Взрыв в силосе. При взрыве под действием давления происходит разрушение боковых стен и перекрытий, а также деформация и разрыв выпускного конуса. Это может привести к распространению ударной волны и выбросу значительных объемов газов, возникающих в результате взрыва, на верхние и нижние этажи силоса.

2. Взрыв в системе аспирации. В этом случае происходит разрушение трубопроводов, деформация циклонов, а также разрушение корпусов вентиляторов и рукавных фильтров. Взрыв приводит к выбросу продуктов сгорания в помещения.

3. Взрыв в производственном помещении. Рассмотрим пути распространения взрывной волны в таких помещениях:

– через проемы в перекрытиях и монтажные отверстия ударная волна, пламя и продукты сгорания проникают в соседние комнаты, поднимая осевшие слои пыли во взвешенное состояние, что приводит к возгоранию образовавшейся аэровзвеси;

– через технические коммуникации огонь и продукты горения поступают в бункера и силосы, переводя пыль со стенок во взвешенное состояние, что также может привести к возгоранию образовавшейся аэровзвеси.

Если в критический момент происходит приемка сырья, вероятность взрыва возрастает. Во время взрыва избыточное давление разрушает систему подачи сырья (самотечные трубы) и аспирационную систему (аспирационные трубопроводы). При этом в смежные помещения и производственные объемы возможно поступление взвешенных органических продуктов (пыли). Данный факт способствует возникновению взрыва в оборудовании.

Разрушение строительных элементов при взрыве может вызвать распространение огня в соседние помещения, что, в свою очередь, приводит к новым взрывам. В результате на данных площадях образуются завалы и скопления новых объемов пыли.

При взрыве в производственных залах огонь и продукты взрывного сгорания могут проникать в лестничные клетки, которые соединяют этажи с производственными помещениями. Накопление пыли в таких местах может привести к цепной реакции взрывов, охватывающих всю лестничную клетку и распространяющихся дальше по зданию.

4. Взрыв в цепном конвейере. Взрыв в цепном конвейере может привести к деформации крышки, а продукты горения могут оказаться в производственном помещении. Догорающие материалы могут перемещаться по технологическим коммутациям и вызвать еще один взрыв.

В результате взрыва возникает избыточное давление, образуется ударная волна, выделяется большое количество тепловой энергии, а также происходит разлет осколков, что может привести к повреждению производственного оборудования и зданий, а также к травмам обслуживающего персонала.

В условиях пожара, когда происходит возгорание легковоспламеняющейся смеси в замкнутом пространстве, давление может достигать значений от 700 до 900 кПа, что представляет собой более чем десятикратное превышение допустимых показателей для оборудования и более чем стократное превышение для строительных конструкций.

⁵ Mitigation of dust explosion risks at feed and grain handling operations / Emre Ergun // Miller Magazine. – 2022. – 27 October. – URL: <https://millermagazine.com/blog/mitigation-of-dust-explosion-risks-at-feed-and-grain-handling-operations-4816> (accessed: October 10, 2024).

Взрыв сопровождается распространением ударной волны, на фронте которой образуется скачок давления. В приближенной к взрыву зоне (около разрушаемого взрывом аппарата) время действия ударной воздушной волны исчисляется миллисекундами, оно имеет импульсный характер воздействия, аналогичный удару. Там, где время воздействия превышает 0,2–0,25 с, травмирующим фактором становится давление и скорость сжатой области. Продукты взрыва достигают температур свыше 1000 °С, что вызывает ожоги и вдыхание высокотоксичных газов, влияющих на здоровье. Воспламенение строительных материалов и продукции может стать причиной пожаров, что приведет к дополнительным потерям и тяжелым последствиям. Разлет осколков и обломков также способствует поражению обслуживающего персонала.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что зерновая отрасль, как основное направление в области обеспечения национальной безопасности страны, требует постоянного совершенствования в части обеспечения промышленной безопасности и систематического мониторинга со стороны надзорно-контролирующих органов.

Для детального анализа вышеуказанной проблематики рассмотрен объект зерновой промышленности – коммунальное унитарное предприятие «Горецкий элеватор» (далее – Горецкий элеватор).

Согласно законодательству⁶ Горецкий элеватор является потенциально опасным объектом в области промышленной безопасности, т.к. в 215 силосах предприятия возможно размещение для хранения более 500 т зерна.

Горецкий элеватор (рис. 1) располагается в юго-восточной части г. Горки Могилевской области. С восточной и северной сторон объект граничит с жилой зоной. С северной стороны расположена д. Нивищи Горецкого района Могилевской области. С южной стороны предприятие граничит с землями общего пользования, принадлежащими унитарному коммунальному производственному предприятию «Коммунальник». На расстоянии 5 км от территории предприятия расположен пожарный аварийно-спасательный пост № 11 Горецкого районного отдела по чрезвычайным ситуациям учреждения «Могилевское областное управление МЧС Республики Беларусь».



Рисунок 1. – Коммунальное унитарное предприятие «Горецкий элеватор»

Основным видом деятельности Горецкого элеватора является хранение и переработка зерна, второстепенным – прием зерновых культур, их очистка, сушка и отгрузка на автомобильный и железнодорожный транспорт.

⁶ О промышленной безопасности: Закон Респ. Беларусь от 5 янв. 2016 г. № 354-З: в ред. от 28 дек. 2023 г. № 324-З. – Минск: ЭНЕРГОПРЕСС, 2023. – 80 с.

В 2024 г. при обследовании Горецкого элеватора был выявлен ряд нарушений требований Правил по обеспечению промышленной безопасности⁷, о чем было проинформировано руководство объекта, а именно:

– отсутствуют датчики нижнего уровня в силосах и бункерах (с соответствующими блокировками), исключающие образование завалов и подпоров. Датчик нижнего уровня сигнализирует о полной разгрузке емкости. Завалы и подпоры способствуют образованию избыточного объема взрывоопасной пылевоздушной смеси, а также аварийной остановке технологического процесса;

– норрии не оснащены устройствами контроля сбегания ленты, позволяющими своевременно обнаружить неисправность в системе транспортировки обрабатываемой продукции. Норрия – механическое устройство промышленного назначения, выполняющее задачу по перемещению обрабатываемого продукта в вертикальной плоскости. Работа агрегата основана на циклическом движении особых ковшей, установленных на транспортном конвейере. Обрабатываемый продукт подхватывается ковшами на нижнем уровне транспортной ленты. Активная эксплуатация конвейерного механизма приводит к механическому износу его элементов, вследствие чего возникает вероятность сбегания ленты, которое влечет образование дополнительной концентрации взрывоопасной пылевоздушной смеси в ограниченном объеме, а также к образованию источников воспламенения – искр;

– не проведен очередной контроль параметров газоочистной установки инструментальным методом, позволяющей определить концентрацию сложных загрязнений в измеряемом объеме помещения. Газоочистная установка – многоступенчатая система, способствующая очистке воздуха от вредных и потенциально опасных элементов, взвешенных в воздухе, в том числе газов. На объектах хранения и переработки зерна установлены пыле- и газуловительные камеры (циклоны), устраняющие мелко- и среднедисперсную сухую пыль. Отказ или несвоевременное обслуживание вышеуказанных установок создает предпосылки для образования опасной концентрации взрывоопасной пылевоздушной смеси;

– между вентилятором № 37 и воздухопроводом не установлены мягкие вставки, которые служат инженерной преградой, позволяющей снизить попадание пыли в производственное помещение. В местах изгиба, а также соединения систем аспирации и газоочистных установок имеются инженерные элементы (вставки, диафрагмы и т.п.), которые должны иметь герметичность, т.к. нарушение их целостности влечет попадание пыли в объемы помещений;

– не проведена герметизация цепного конвейера подсилосного этажа подсилосного корпуса № 3 с целью исключения возможности распространения по ним взрыва. Система герметизации цепного конвейера включает элементы пылеподавления, такие как пылезащитные ткани, обеспечивающие контроль пыления, а также боковые юбки и уплотнительные ленты, предотвращающие высыпание обрабатываемого продукта по бокам. Исправность данной системы не только повышает взрывозащищенность технологического процесса, но и снижает материальные потери в процессе транспортировки веществ;

– на ленточном транспортере элеватора выгрузки зерна и железнодорожных вагонов не предусмотрена расстановка кнопок «Стоп» на расстоянии, не превышающем 10 м друг от друга, что позволяет своевременно остановить производственный процесс и тем самым снизить концентрацию пылевоздушной смеси в производственном помещении при возникновении аварийной ситуации. Несвоевременная остановка технологического процесса во время аварии или инцидента влечет увеличение объема взрывоопасной пылевоздушной смеси

⁷ Об утверждении Правил по обеспечению промышленной безопасности взрывоопасных производств и объектов хранения и переработки зерна: постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 31 июля 2017 г. № 35. – Минск: ЭНЕРГОПРЕСС, 2017. – 61 с.

в объемах помещений за счет выброса обрабатываемого продукта за пределы ленточного транспортера, а также образованию источников воспламенения за счет аварийной работы транспортера, вследствие трения механических элементов, образования искр и т.д.

На основании проведенного анализа литературных источников и статистических данных, а также с учетом практического обследования объекта для повышения уровня пожарной и промышленной безопасности объектов по переработке и хранению зерна следует учесть следующие требования:

- конструкции технических устройств и трубопроводов должны обеспечивать герметичность (с течением времени технические устройства и трубопроводы в некоторых местах прохудились);
- оснастить силосы (бункеры) эффективными средствами выгрузки (внутренние поверхности стен силосов и бункеров, их днища должны быть гладкими (без выступов, ребер, поясов, впадин, шероховатостей), обеспечивающими полный выход из них продукта);
- предусмотреть применение токопроводящих полимерных покрытий стен силосов (бункеров) для улучшения истекания продуктов хранения из них;
- предусмотреть средства автоматизированного (автоматического) дистанционного контроля температуры зерна, продуктов его переработки, обеспечивающих обнаружение очага самосогревания на ранних стадиях;
- предусмотреть применение средств газового анализа (контроля);
- обновить организационные и организационно-технические мероприятия, обеспечивающие взрывобезопасность объекта;
- предусмотреть средства подачи в технические устройства и (или) продуктопроводы инертных газов, флегматизирующих добавок с целью исключения распространения взрыва;
- предусмотреть возможность контроля температуры подшипников турбокомпрессоров, турбовоздуходувок, вальцевых станков и дробилок;
- предусмотреть светозвуковую сигнализацию пуска электродвигателей, технические устройства и контроль их работы;
- предусмотреть производственную двустороннюю громкоговорящую связь и телефонную связь оператора с рабочими местами;
- предусмотреть автоматические огнепреграждающие (пламеотсекающие) устройства на технологических коммуникациях.

Заключение

Производство, хранение и переработка зерна играет важную роль в развитии сельского хозяйства, что напрямую влияет на темпы развития других отраслей в Республике Беларусь. Анализ литературных источников и статистических данных показал, что на объектах зернового производства по-прежнему происходят пожары и взрывы, что приводит к значительному материальному ущербу, а также травмированию и гибели людей.

В связи с тем что технологический процесс переработки и хранения зерна на протяжении многих лет не претерпевал кардинальных изменений, выявленные в ходе практического обследования Горецкого элеватора недостатки могут присутствовать и на других объектах хранения и переработки зерна в Республике Беларусь. Это свидетельствует о возможности возникновения чрезвычайных ситуаций на подобных объектах, что требует постоянного совершенствования нормативных правовых актов, подходов в пожарно-профилактической работе, а также деятельности руководящего и рабочего персонала по обеспечению пожарной и промышленной безопасности объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадина, В.М. Современное состояние производства зерновых культур в Беларуси / В.М. Бадина // Экономический рост Республики Беларусь: глобализация, инновационность, устойчивость: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 мая 2023 г. – Минск: БГЭУ, 2023. – С. 56.

2. Кашинцева, Л.В. Причины аварий и инцидентов на объектах хранения и переработки зерна / Л.В. Кашинцева, Е.Ф. Евдокимова // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 19-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула, 9–10 ноября 2023 г. – Тула: ТГУ, 2023. – С. 343–350.
3. Буякевич, А.Л. Проблемы определения категории по взрывопожарной и пожарной опасности помещений, связанных с обращением пыли / А.Л. Буякевич, С.Н. Бобрышева, О.Л. Бобович, А.В. Колтунчик // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2012. – Т. 7, № 2. – С. 69–75. – EDN: TKVQLH.
4. Карауш, С.А. Основы процессов горения и взрывов: учеб. пособие / С.А. Карауш. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2008. – 278 с.
5. Васильев, Я.Я. Взрывобезопасность на предприятиях по хранению и переработке зерна / Я.Я. Васильев, Л.И. Семенов. – М.: Колос, 1983. – 224 с.

**Обеспечение взрывобезопасности объектов хранения и переработки зерна на примере
КУП «Горецкий элеватор»**

**Ensuring explosion safety of grain storage and processing facilities on the example of the
Municipal Unitary Enterprise «Goretsky elevator»**

Аушев Игорь Юрьевич

кандидат технических 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: ai@ucp.by
SPIN-код: 2558-7937

Igor Yu. Aushev

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,
Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: ai@ucp.by
ORCID: 0000-0003-4425-2085

Иванистов Александр Сергеевич

Учреждение «Могилевское областное
управление МЧС Республики Беларусь»,
Дрибинский районный отдел по чрезвычайным
ситуациям, заместитель начальника отдела
Адрес: ул. Зеленая, 11,
213971, г.п. Дрибин,
Могилевская область, Беларусь
Email: dribin-mchs@mchs.gov.by

Aleksandr S. Ivanistov

Institution «Mogilev Regional Administration
of the Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus», Dribinsky District
Department of Emergency Situations,
Deputy Head of the Department
Address: Zelenaya str., 11,
213971, Dribin,
Mogilev region, Belarus
Email: dribin-mchs@mchs.gov.by

ENSURING EXPLOSION SAFETY OF GRAIN STORAGE AND PROCESSING FACILITIES ON THE EXAMPLE OF THE MUNICIPAL UNITARY ENTERPRISE «GORETSKY ELEVATOR»

Aushev I.Yu., Ivanistov A.S.

Purpose. To conduct an explosion safety analysis of the grain storage and processing, to determine accidents and incidents typical for this facility.

Methods. General scientific research methods: analysis and synthesis, comparison and generalization.

Findings. The main causes of explosions at grain storage and processing facilities were determined.

Application field of research. The results of the work can be used in the training of specialists in the field of emergency prevention and response, industrial safety, in the course of fire prevention activities.

Keywords: industrial safety, grain storage and processing, dust, explosion.

(The date of submitting: November 22, 2024)

REFERENCES

1. Bad'ina V.M. Sovremennoe sostoyanie proizvodstva zernovykh kul'tur v Belarusi [Current state of grain production in Belarus]. *Proc. of XVI Intern. scientific-practical conf. «Ekonomicheskij rost Respubliki Belarus': globalizatsiya, innovatsionnost', ustoychivost'», Minsk, May 19, 2023.* Minsk: Belarusian State University of Economics, 2023. Pp. 56. (rus)
2. Kashintseva L.V., Evdokimova E.F. Prichiny avariyy i intsidentov na ob'ektakh khraneniya i pererabotki zerna [Causes of accidents and incidents at grain storage and processing facilities]. *Proc. of 19th Intern. conf on the mining industry, building and energetic problems «Socio-economic and environmental problems of the mining industry, building and energetics», Tula, November 9–10, 2023.* Tula: Tula State University, 2023. Pp. 343–350. (rus)
3. Buyakevich A.L., Bobrysheva S.N., Bobovich O.L., Koltunchik A.V. Problemy opredeleniya kategorii po vzryvopozharnoy i pozharnoy opasnosti pomeshcheniy, svyazannykh s obrashcheniem pyli [Problems of determining the category of explosion and fire hazard of premises associated with dust handling]. *Emergency Situations: Education and Science*, 2012. Vol. 7, No. 2. Pp. 69–75. (rus). EDN: TKVQLH.
4. Karaush S.A. Osnovy protsessov goreniya i vzryvov [Fundamentals of combustion and explosion processes]: tutorial. Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Building, 2008. 278 p. (rus)
5. Vasil'ev Ya.Ya., Semenov L.I. *Vzryvobezopasnost' na predpriyatiyakh po khraneniyu i perarabotke zerna* [Explosion safety at grain storage and processing plants]. Moscow: Kolos, 1983. 224 p. (rus)

Copyright © 2025 Aushev I.Yu., Ivanistov A.S.

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

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ НАЧАЛЬНИКА ПОЖАРНОЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ СЛУЖБЫ НА ПРОВЕДЕНИЕ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ И ДРУГИХ НЕОТЛОЖНЫХ РАБОТ

Хроколов В.А.

Цель. Разработка алгоритма действий начальника пожарной аварийно-спасательной службы при выработке решения на проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ на территории города (района) с использованием компьютерной программы поддержки принятия решения.

Методы. Общенаучные методы исследования (анализ, синтез, сравнение и обобщение), практический эксперимент.

Результаты. Описана последовательность действий начальника и должностных лиц органа управления пожарной аварийно-спасательной службы по выработке решения на проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ с использованием компьютерной программы поддержки принятия решения.

Область применения исследований. Результаты работы могут быть использованы в практической деятельности начальников и должностных лиц органов управления пожарной аварийно-спасательной службой, в учебном процессе при подготовке специалистов в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в научных исследованиях, связанных с изучением аспектов подготовки сил гражданской обороны к проведению аварийно-спасательных и других неотложных работ.

Ключевые слова: гражданская оборона, аварийно-спасательные и другие неотложные работы, средства поражения, пожарная аварийно-спасательная служба.

(Поступила в редакцию 10 января 2025 г.)

Введение

Статистика показывает, что с каждым новым военным конфликтом число пострадавших мирных граждан постоянно растет. Так, если в ходе Первой мировой войны количество гражданского населения составило всего лишь 5 % от общего числа погибших, то уже в ходе войны во Вьетнаме около 90 % [1]. Современные вооруженные конфликты не являются исключением. Более того, в ходе их ведения противоборствующими сторонами наносятся целенаправленные удары по объектам экономики и гражданской инфраструктуры. Это приводит к разрушениям промышленных, социальных и иных гражданских объектов, увеличению числа погибших мирных граждан. Ярким примером этому служат удары Вооруженных сил Израиля по территории сектора Газа, в результате которых погибло более 39 тыс. и ранено около 91 тыс. человек¹.

Очевидно, что в этих условиях основной задачей сил гражданской обороны (далее – ГО), в том числе сил пожарной аварийно-спасательной службы (далее – ПАСС), будет являться проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ (далее – АСДНР), направленных на спасение людей и оказание помощи пострадавшим.

Одними из ключевых факторов, которые будут оказывать непосредственное влияние на снижение тяжести последствий и сокращение числа погибших в этих условиях, будут являться правильность и обоснованность управленческих решений, а также время, затрачиваемое на подготовку к проведению АСДНР, и время их проведения.

¹ Бацазова, Ф. Стало известно число жертв действий израильских сил в секторе Газа / Ф. Бацазова // lenta.ru – Новости России и мира сегодня. – 2024. – 3 авг. – URL: <https://lenta.ru/news/2024/08/03/stalo-izvestno-chislo-zhertv-deystviy-izrailskih-sil-v-sektore-gaza/> (дата обращения: 03.08.2024).

Основная часть

Изучение организации работы органа управления ПАСС по подготовке к проведению АСДНР на территории города (района) показывает, что ее основу будут составлять:

- полученная задача;
- сроки ее выполнения (время проведения АСДНР);
- указания начальника службы и начальника органа управления ПАСС по порядку организации работы;
- условия, в которых организуется работа, по подготовке к проведению АСДНР (заблаговременно, в ходе ведения боевых действий) [2].

Основой же для применения сил ПАСС при ликвидации последствий применения противником оружия является решение начальника службы на проведение АСДНР, принимаемое заблаговременно еще в условиях мирного времени.

В то же время следует отметить, что с началом ведения ГО производится уточнение плана ГО, а в каждой из служб ГО, в том числе ПАСС, уточняется решение начальника службы на применение подчиненных сил и средств.

Поэтому с получением приказа (распоряжения) о подготовке к применению сил ПАСС к ликвидации последствий применения противником оружия начальник службы и должностные лица органа управления приступают к уточнению решения на проведение АСДНР на территории города (района).

Общеизвестно, что в общем виде последовательность действий начальника ГО города (района) по подготовке сил ГО к ликвидации последствий применения противником оружия включает:

- уяснение поставленной задачи;
- определение мероприятий, которые необходимо выполнить немедленно для подготовки сил ГО к выполнению поставленной задачи;
- оценку обстановки;
- выработку замысла;
- принятие решения;
- постановку задач;
- планирование;
- организацию всестороннего обеспечения, взаимодействия и управления;
- контроль [3].

Поскольку силы ПАСС являются составным элементом сил ГО города (района), последовательность действий начальника ПАСС при подготовке подчиненных сил к проведению АСДНР на территории города (района) должна представлять аналогичную последовательность действий, но с учетом специфики применения сил службы.

В общем виде последовательность действий начальника службы города (района) по подготовке к проведению АСДНР можно представить в следующем виде (рис. 1).

При уяснении полученной задачи начальнику службы следует понять замысел начальника ГО города (района) по ликвидации последствий применения противником оружия, направление сосредоточения основных усилий, порядок проведения АСДНР, цель действий и задачи службы, задачи иных сил ГО, привлекаемых к проведению АСДНР, порядок взаимодействия с ними.

При оценке обстановки в ходе уточнения решения начальник службы должен оценить возможные последствия ударов по объектам тыла, состояние подчиненных сил и средств, местность и условия проведения АСДНР. Основные данные, подлежащие оценке, представлены на рисунке 2.

Оценив возможную обстановку, начальник службы делает краткие выводы, в которых отражает ориентировочные потери, возможную степень поражения объектов и коммуникаций на территории города (района), возможные виды предстоящих АСДНР и их объемы.

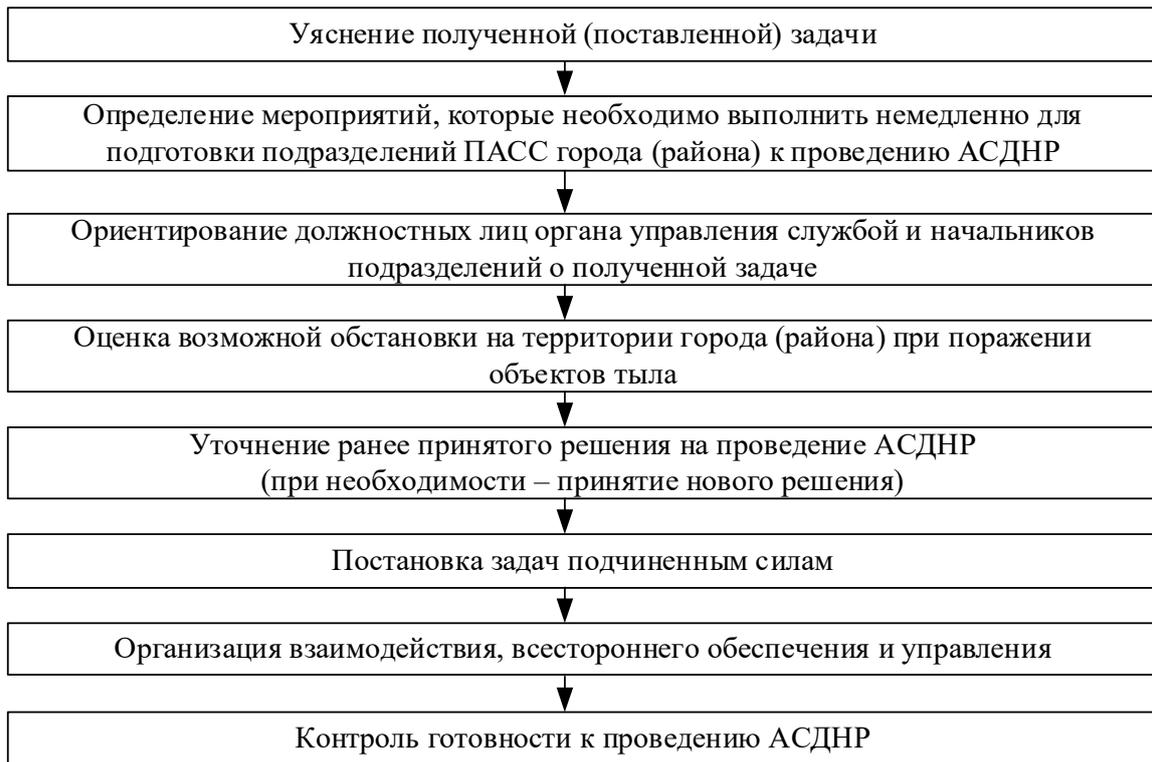


Рисунок 1. – Последовательность действий начальника ПАСС по организации подготовки к проведению АСДНР

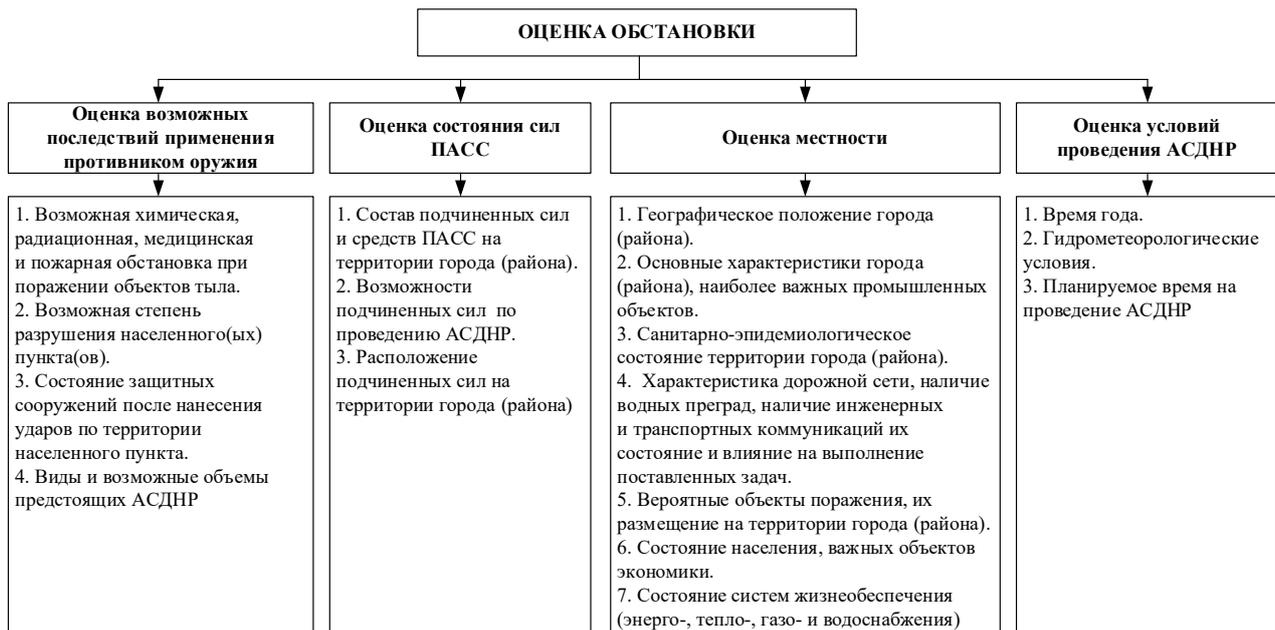


Рисунок 2. – Подлежащие оцениванию данные при оценке обстановки (составлено по [2; 3])

В дальнейшем, после уяснения поставленной задачи и формулирования выводов из оценки обстановки, начальник службы приступает к определению замысла проведения АСДНР силами ПАСС. В нем целесообразно отразить цель предстоящих действий и задачи ПАСС при ликвидации последствий применения противником оружия, объекты (участки), на которых сосредотачиваются основные усилия, способы и последовательность выполнения задач, привлекаемые силы службы, порядок их применения.

Выработав замысел, начальник ПАСС доносит его до должностных лиц органа управления службой и начальников подчиненных подразделений. Затем, заслушав их предложения, принять решение на проведение АСДНР и приступить совместно с должностными лицами

органа управления службой к планированию дальнейших действий по проведению АСДНР. В ходе планирования ими определяются порядок и последовательность проведения АСДНР, а также проводятся расчеты объемов, предстоящих АСДНР и распределение сил ПАСС по объектам проведения работ.

В то же время опыт проведенных учений показывает, что прогнозирование возможной обстановки и распределение сил службы по объектам проведения работ вызывает наибольшие затруднения в деятельности должностных лиц органа управления, поскольку им необходимо провести математические расчеты, требующие значительных временных затрат в условиях жесткого ограничения во времени на их проведение.

Очевидно, что в таких условиях выполнить необходимые математические расчеты для большого количества объектов без применения электронных вычислительных средств представляется маловероятным. Поэтому в деятельности должностных лиц органов управления ПАСС используется ряд компьютерных программ, позволяющих произвести необходимые расчеты для прогнозирования возможной обстановки при отдельных чрезвычайных ситуациях (например, химические аварии, гидрологические чрезвычайные ситуации, пожары). Однако следует отметить, что данные компьютерные программы не предоставляют инструментов, позволяющих рассчитать необходимое количество сил ПАСС в группировке ГО, привлекаемой к проведению АСДНР на территории города (района).

Для решения данной задачи разработана соответствующая расчетная методика [4]. Ее наличие позволяет определить необходимое количество сил службы в составе группировки ГО, привлекаемой к проведению АСДНР, и, как следствие, повысить обоснованность решения начальника службы на проведение АСДНР.

Сокращение требуемого времени на проведение оперативных расчетов в ходе выработки решения требует не только наличия соответствующей расчетной методики, но и автоматизации данного процесса. С этой целью на основании методики [4] была разработана компьютерная программа, которая позволяет рассчитать показатели возможной обстановки при поражении объектов тыла на территории города (района) и необходимое количество сил ПАСС в составе группировки ГО, привлекаемой к проведению АСДНР.

Оценка показателей возможной обстановки в программе производится для трех групп объектов: не потенциально опасные объекты (далее – НПОО), химически опасные объекты (далее – ХОО), пожаровзрывоопасные объекты (далее – ПВОО). Для оперативного проведения расчетов с использованием компьютерной программы должностным лицам органов управления ПАСС целесообразно заранее сформировать в программе базу данных об объектах, расположенных на территории города (района), разделив их на три группы: НПОО, ХОО, ПВОО.

Для этого необходимо в боковой панели главного меню программы выбрать вид объекта (рис. 3) и в открывшемся окне ввести исходные данные для рассматриваемого объекта и сохранить их (рис. 4). В результате данные об объекте будут внесены в программу. Для внесения данных в программу о последующих объектах процесс следует повторить.

Таким образом, программа формирует базу данных об объектах и в последующем позволяет произвести расчет показателей возможной обстановки на объекте и необходимого количества сил ПАСС для проведения АСДНР без повторного введения исходных данных.

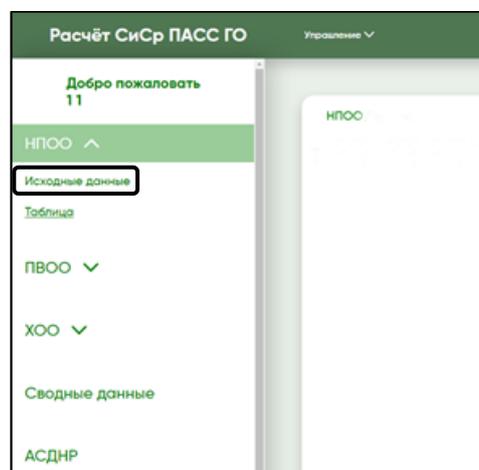


Рисунок 3. – Главное меню

Рисунок 4. – Пример окна исходных данных об объекте

В дальнейшем для проведения расчетов в сформированной базе данных выбирается объект, на котором требуется рассчитать показатели возможной обстановки (рис. 5) и нажимается кнопка «расчет». В результате на экран монитора выводятся данные о возможной обстановке при поражении объекта обычными средствами поражения (рис. 6).

№	Адрес объекта экономики	Наименование объекта	Деятельность в в/в	Площадь объекта, м2	Плотность объекта, %	Средняя высота промышленных зданий, м	Численность наибольшей рабочей смены, чел
1	1	1	Продолжает	5	30	15	234
2	Иваново	Завод	Продолжает	10000	30	21	157

Рисунок 5. – Пример вкладки таблицы базы данных об объектах

Кроме этого, по запросу оператора на экран монитора может выводиться таблица сводных данных, в которой отображаются:

- прогнозируемые объемы АСДНР на отдельном объекте или группе объектов;
- объем АСДНР, который целесообразно возложить на силы ПАСС при ликвидации последствий применения противником оружия в составе группировки ГО города (района);
- требуемое количество сил службы для его выполнения (рис. 7).

Результаты практической апробации представленной компьютерной программы при проведении в 2024 г. комплексных учений с органами управления и силами Партизанского районного звена Минской городской подсистемы Государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и гражданской обороны показали, что ее использование должностными лицами органа управления ПАСС при прогнозировании возможной

обстановки позволяет сократить до 30 % время, необходимое для проведения оперативных расчетов в ходе выработки и принятия решения начальником службы на проведение АСДНР.

Результаты расчета ✕

Результат "Фабрика"

S зоны заражения	<input type="text"/>	S поиска пострадавших в завалах	<input type="text"/>
Глубина зоны заражения	<input type="text"/>	Общие потери	<input type="text"/>
L маршрутов ведения химической разведки	<input type="text"/>	Санитарные потери	<input type="text"/>
S очага заражения	<input type="text"/>	Безвозвратные потери	<input type="text"/>
V завалов, подлежащих разбору	<input type="text"/>	Количество заваленных людей	<input type="text"/>
V завалов, подлежащих разбору для извлечения пострадавших	<input type="text"/>	Количество типовых боеприпасов применяемых по объекту	<input type="text"/>
L маршрута инженерной разведки	<input type="text"/>		

Рисунок 6. – Окно вывода расчетных показателей возможной обстановки на объекте

Сводные данные 🔗

Скачать таблицу
Сильная - 0,7 ▼

Общее количество Л/С 20 чел.

№ п/п	Наименование объекта	Вид объекта (НПОО, ХОО, ПВОО)	Вид АСДНР					
			Инженерная разведка, км	Площадь поиска пострадавших в завалах, км ²	Разборка завалов для извлечения пострадавших, м ³	Расчистка маршрутов и проездов в завалах, км	Протяженность зоны огня (тушение пожаров), км	Площадь зоны пожаров, км ²
1	Завод	ПВОО						
Итого (V АСДНР j)								
Max Vасднр на i-ом объекте поражения								
Объем работ j-го вида выполняемый силами ПАСС ГО								
Объем работ на МАХ объекте выполняемый силами ПАСС ГО								
Количество отделений ПАСС ГО для проведения АСДНР								
Количество личного состава ПАСС ГО для ведения АСДНР								

Рисунок 7. – Форма результатов расчета требуемого количества сил ПАСС для проведения АСДНР

Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Порядок работы начальника ПАСС и должностных лиц органа управления службой города (района) по подготовке к проведению АСДНР силами ПАСС не должен кардинально отличаться от порядка работы начальника и должностных лиц штаба ГО по подготовке к проведению АСДНР силами ГО города (района).

2. Одним из наиболее сложных этапов в деятельности должностных лиц органов управления ПАСС, требующих значительных временных затрат на проведение оперативных расчетов, является прогнозирование возможной обстановки при поражении объектов тыла и определение необходимого количества сил службы для проведения АСДНР на этих объектах.

3. Внедрение в практическую деятельность компьютерной программы поддержки принятия решения позволит не только сократить требуемое время на проведение оперативных расчетов в ходе выработки решения на проведение АСДНР, но и повысить его обоснованность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев, Ю.Л. Современные войны и гражданская оборона / Ю.Л. Воробьев // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – Т. 2, № 1 (2). – С. 791–810. – EDN: OWFYSL.
2. Гражданская оборона. – Изд. 2-е, перераб.; под общ. ред. В.А. Пучкова; МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 414 с. – ISBN 978-5-93970-147-1.
3. Организация выполнения мероприятий гражданской обороны: метод. руководство / В.Н. Полещук, Л.Ф. Дедуль, А.А. Новиков [и др.]; под общ. ред. Э.Р. Бариева. – Минск: РЦСиЭ МЧС Республики Беларусь, 2010. – 249 с.
4. Хроколов, В.А. Методика определения состава и численности пожарной аварийно-спасательной службы в составе группировки сил ГО, привлекаемой к ликвидации последствий применения противником средств огневого поражения / В.А. Хроколов, И.К. Мурзич // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т. 7, № 4. – С. 426–435. – DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-4.426. – EDN: JRGME.

**Компьютерная программа поддержки принятия решения начальника
пожарной аварийно-спасательной службы на проведение
аварийно-спасательных и других неотложных работ**

**Computer programme to support the decision of the head of the fire emergency rescue service
to carry out emergency rescue and other urgent works**

Хроколов Виталий Александрович

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

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

Email: Xrvavit2604@gmail.com

SPIN-код: 8926-3945

Vitaliy A. Khrokolov

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

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

Email: Xrvavit2604@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6577-4061

**COMPUTER PROGRAMME TO SUPPORT THE DECISION
OF THE HEAD OF THE FIRE EMERGENCY RESCUE SERVICE
TO CARRY OUT EMERGENCY RESCUE AND OTHER URGENT WORKS**

Khrokolov V.A.

Purpose. Development of an algorithm of actions for the head of the fire emergency rescue service when making a decision to carry out emergency rescue and other urgent work on the territory of the city (district) using a computer program to support decision-making.

Methods. General scientific research methods (analysis, synthesis, comparison and generalization), practical experiment.

Findings. The sequence of actions of the head and officials of the fire emergency rescue service management body for developing a decision to carry out emergency rescue and other urgent work using a computer program to support decision-making is described.

Application field of research. The results of the work can be used in the practical activities of heads and officials of the management bodies of the fire emergency rescue service, in the educational process in the training of specialists in the field of prevention and elimination of emergency situations, in scientific research related to the study of aspects of the preparation of civil defense forces for emergency rescue and other urgent work.

Keywords: civil defense, emergency rescue and other urgent work, weapons, fire emergency rescue service.

(The date of submitting: January 10, 2025)

REFERENCES

1. Vorob'ev, Yu.L. *Sovremennyevoyny i grazhdanskaya oborona* [Modern wars and civil defense]. *Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya*, 2012. Vol. 2, No. 1(2). Pp. 791–810. (rus). EDN: OWFYSL.
2. *Grazhdanskaya oborona* [Civil Defense]. Edition 2nd revised. Ed. by V.A. Puchkov; Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow: FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, 2017. 414 p.(rus). ISBN 978-5-93970-147-1.
3. Poleshchuk V.N., Dedul' L.F., Novikov A.A., Vil'chik S.I., Sudas A.A., Sivets O.A., Vasyukevich A.S. *Organizatsiya vpolneniya meropriyatiy grazhdanskoy oborony* [Organisation of the implementation of civil defence measures]: methodological guide. Ed. by E.R. Bariev. Minsk: Republican Center for Certification and Expertise of Licensed Activities of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 2010. 249 p. (rus)
4. Khrokolov V.A., Murzich I.K. Metodika opredeleniya sostava i chislennosti pozharной avariyno-spasatel'noy sluzhby v sostave gruppirovki sil GO, privilekaemoy k likvidatsii posledstviy primeneniya protivnikom sredstv ogneвого porazheniya [Methodology for determining the composition and size of the fire emergency rescue service as a part of civil defense forces involved in eliminating the consequences of use of fire defeat by adversary]. *Journal of Civil Protection*, 2023. Vol. 7, No. 4. Pp. 426–435. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-4.426. EDN: JRGME.

Copyright © 2025 Khrokolov V.A.

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

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

**К 100-летию со дня основания
Белорусского добровольного пожарного общества**

Кудряшов А.Н., Галалюк С.С.

**To the 100th anniversary of the founding
of the Belarusian Volunteer Firefighting Society**

Kudryashov A.N, Galalyuk S.S.

В декабре 2024 г. в нашей стране отмечалась знаменательная дата – 100-летие со дня основания Белорусского добровольного пожарного общества, являющегося одним из старейших общественных объединений в стране, сохранившим признание и уважение граждан, и продолжающим многовековые традиции развития пожарного добровольчества.

Первое вольное пожарное общество образовано в 1872 г. в Витебске. Первый устав общества утвержден Министром внутренних дел 20 июня 1876 г. в Минске. В этом же году общество начало функционировать. Установлен район выезда: Минск, Борисов, Столбцы, Бобруйск, Радошковичи. Обществу принадлежали два каменных депо с жилыми помещениями на собственной земле.

В 1876 г. в Полоцке образована вольная пожарная команда. В 1890 г. создано вольное пожарное общество в Борисове, в 1891 г. – в Несвиже, 1892 г. – в Пинске, 1894 г. – в Лепеле. В 1896 г. вольные пожарные общества созданы в Могилеве, Сенно (Могилевской губернии) и Смолевичах (Борисовский уезд). В 1898 г. при Минском пожарном обществе созданы артели трубочистов, очисткой труб в городе занимались 20 мастеров и 15 подмастерьев. В 1912 г. впервые начала функционировать сельская пожарная дружина в Заславле.

Вскоре подобные пожарные общества стали создаваться по всей территории современной Беларуси. Однако действовали они достаточно разобщенно, что привело к идее создания центрального объединяющего органа. И на 1-й Всебелорусской конференции коммунальных работников в сентябре 1924 г. было принято решение о создании Всебелорусского добровольного пожарного общества. Тогда же был выработан проект его устава, который утвержден НКВД БССР 12 декабря 1924 г.¹

К 1 октября 1925 г. в БССР действовало 975 добровольных обществ и дружин, членами которых являлись 27 667 человек.

В 2006 г. Белорусское добровольное пожарное общество получило статус республиканского государственно-общественного объединения. Именно в этом качестве общество стало неотъемлемой частью общей системы пожарной безопасности и сегодня осуществляет свою деятельность в тесном взаимодействии с МЧС, которое, в свою очередь, уполномочено быть представителем Республики Беларусь в РГОО «БДПО» и вошло в состав его членом в качестве юридического лица².

Сегодня Белорусское добровольное пожарное общество – это уже не просто пожарные добровольцы, а объединение небезразличных людей, которые обеспечивают развитие белорусского пожарного добровольческого движения с учетом современных реалий.

Пожарные добровольцы активно сотрудничают со спасателями в рамках проведения пожарно-профилактической работы в жилищном фонде и участвуют в благотворительных

¹ История и традиции пожарного добровольчества в Беларуси // Официальный сайт РГОО «БДПО». – URL: <https://bdpo.by/ob-obshhestve/history/> (дата обращения: 30.12.2024).

² 100 лет исполнилось Белорусскому добровольному пожарному обществу // Официальный сайт Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – 2024. – 12 дек. – URL: <https://mchs.gov.by/glavnoe/473925/> (дата обращения: 30.12.2024).

акциях по установке автономных пожарных извещателей, ремонту электропроводки и печного отопления наиболее уязвимым категориям населения, среди которых ветераны, люди с ограниченными возможностями и многодетные семьи.

В соответствии с уставом на Белорусское добровольное пожарное общество возложены следующие государственно-значимые задачи:

– объединение усилий граждан для обеспечения пожарной безопасности на территории Республики Беларусь;

– создание добровольных пожарных формирований, организация и координация их деятельности, в том числе при осуществлении пожарно-профилактических мероприятий, тушении пожаров;

– участие в создании внештатных пожарных формирований;

– содействие органам и подразделениям по чрезвычайным ситуациям в предупреждении и (или) тушении пожаров;

– содействие в реализации программ в области предупреждения и тушения пожаров;

– обучение населения мерам пожарной безопасности;

– иные задачи, определяемые Президентом Республики Беларусь³.

Также БДПО осуществляет различные виды противопожарных работ, а часть вырубленных средств направляет на развитие пожарного добровольчества, проведение противопожарных мероприятий, поддержку пожарно-спасательного спорта, молодежного и ветеранского движений.

Сегодня в рядах пожарных добровольцев насчитывается свыше 14 тыс. граждан, которые продвигают идеи пожарного добровольчества на областном, городском и районном уровнях⁴. Зарегистрированы 133 областные, межрайонные, районные и городские организационные структуры, объединившие около 10 тыс. добровольцев. Начиная с 16-летнего возраста, каждый молодой человек имеет право самостоятельно решать вопрос о вступлении в члены организации⁵. С письменного согласия родителей или опекунов вступать в члены Белорусского добровольного пожарного общества возможно и в более раннем возрасте.

³ Цели и задачи // Официальный сайт РГОО «БДПО». – URL: <https://bdpo.by/ob-obshhestve/goals/> (дата обращения: 30.12.2024).

⁴ См. сноску 2.

⁵ Как стать добровольцем // Официальный сайт РГОО «БДПО». – URL: <https://bdpo.by/ob-obshhestve/volunt/> (дата обращения: 30.12.2024).

К 100-летию со дня основания Белорусского добровольного пожарного общества
To the 100th anniversary of the founding of the Belarusian Volunteer Firefighting Society

Кудряшов Александр Николаевич

Республиканское государственно-
общественное объединение «Белорусское
добровольное пожарное общество»,
председатель

Адрес: ул. Олешева, 14,
220090, Беларусь, г. Минск
Email: info@bdpo.by

Aleksandr N. Kudryashov

Republican State-Public Association
«Belarusian Volunteer Firefighting Society»,
Chairman

Address: Olesheva str., 14,
220090, Belarus, Minsk
Email: info@bdpo.by

Галалиук Святослав Семенович

Департамент по надзору за безопасным
ведением работ в промышленности
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь, отдел правового
обеспечения, главный специалист

Адрес: ул. Казинца, 86/1,
220108, Беларусь, г. Минск
Email: slavagalaliuk@gmail.com

Svyatoslav S. Galaluk

Department for Supervision of Industrial Safety
of the Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus,
Legal Support Department,
Chief Specialist

Address: Kazintsa str., 86/1,
220108, Belarus, Minsk
Email: slavagalaliuk@gmail.com

**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);
- «Ответственные за исправное состояние и безопасную эксплуатацию оборудования под давлением»;
- «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 и исполнители работ)»;
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах Республики Беларусь»;
- «Промышленная безопасность»;
- «Руководство фейерверочными показами»;
- «Организация и обеспечение промышленной безопасности при обращении пиротехнических изделий»;
- «Безопасность горных работ»;
- «Экспертная деятельность в промышленной безопасности»;
- «Ответственные за безопасную эксплуатацию котельной»;
- «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, русский язык как иностранный, белорусский язык, английский язык, немецкий язык, французский язык, история, обществоведение, химия (очная/дистанционная форма обучения).

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

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

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

Научный журнал

Вестник
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси
Том 9, № 1, 2025

Подписано в печать 25.02.2025.
Формат 60×84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 15,93. Уч.-изд. л. 10,61.
Тираж 35 экз. Заказ 063-2025.

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