



Основан в 2016 году
Выходит 4 раза в год

Научный журнал
Вестник
Университета гражданской защиты
МЧС Беларуси
(Journal of Civil Protection)
Том 5, № 1, 2021

Редакционная коллегия:

главный редактор:

Полевода
Иван Иванович

кандидат технических наук,
доцент

зам. главного редактора:

Гончаренко
Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Платонов
Александр Сергеевич

кандидат физико-математических
наук, доцент

Редакционный совет:

Лешенюк Николай Степанович, доктор физико-математических наук, профессор – председатель; Богданова Валентина Владимировна, доктор химических наук, профессор – зам. председателя; Акулов Артем Юрьевич, кандидат технических наук (Россия); Альгин Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор; Байков Валентин Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник; Бирюк Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент; Волянин Ежи, доктор технических наук, профессор (Польша); Иваницкий Александр Григорьевич, кандидат технических наук, доцент; Иванов Юрий Сергеевич, кандидат технических наук; Ильюшонок Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Каван Степан, доктор технических наук (Чехия); Калач Андрей Владимирович, доктор химических наук, доцент (Россия); Камлюк Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент; Карпиленя Николай Васильевич, доктор военных наук, профессор; Ковтун Вадим Анатольевич, доктор технических 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); Лебедкин Александр Владимирович, доктор военных наук, профессор; Пастухов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Поздеев Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор (Украина); Порхачев Михаил Юрьевич, кандидат педагогических наук, доцент (Россия); Соколов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор (Россия); Тихонов Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент; 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.

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: (017) 340-53-93 (главный редактор)
(017) 341-32-99

Сайт Университета гражданской защиты: www.ucsp.by

E-mail редакции: vestnik@ucsp.by

ISSN 2519-237X (print)

ISSN 2708-017X (online)

© Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Пожарная и промышленная безопасность (технические науки)

Суриков А.В., Лешенюк Н.С. Определение характеристик дымообразующей способности строительных материалов и расчет видимости при пожаре..... 5

Суриков А.В., Лешенюк Н.С., Кулешов В.К. Генератор наносекундных импульсов накачки для активно-импульсной системы видения в дыму и расчет дальности ее действия 20

Кудряшов В.А., Жамойдик С.М., Кураченко И.Ю., Мордич М.М. Конструирование железобетонного монолитного перекрытия в составе фрагмента каркасного здания для исследований огнестойкости в рамках натурных огневых испытаний 33

Кудряшов В.А., Жамойдик С.М., Кураченко И.Ю., Нгуен Т.К. Результаты натурных огневых испытаний железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания 49

Ощепков А.М., Грачулин А.В., Потеряев Ю.К., Рябцев В.Н., Лихоманов А.О. Совершенствование методики гидравлического расчета спринклерных автоматических установок пожаротушения 67

Навроцкий О.Д., Камлюк А.Н., Грачулин А.В., Лихоманов А.О., Скорупич И.С., Гусаров И.С., Полочанин Н.С. Научно-обоснованные требования к устройству и техническим характеристикам установок генерирования компрессионной пены и методика их испытаний 81

Пастухов С.М., Платонов А.С., Тетерюков А.В., Дробыш А.С. Математическая модель определения углового коэффициента облученности при расчете противопожарных разрывов между зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов..... 93

Безопасность в чрезвычайных ситуациях (технические науки)

Пастухов С.М., Османов Х.С., Миканович Д.С. Нормативное регулирование безопасности водных объектов 104

Гражданская оборона

Бордак С.С. Методический подход к прогнозированию и оценке обстановки для поддержки принятия решений по организации гражданской обороны в условиях диверсионно-террористического воздействия 113

Разное (обзоры)

Самсоник А.Р., Чумила Е.А., Демьянов В.В., Попко Е.Р. Эмпирическая обусловленность силовой физической нагрузки и выносливости при формировании профессиональных навыков в пожарной аварийно-спасательной подготовке..... 124

Правила предоставления статей 132

CONTENTS

Fire and industrial safety (technical sciences)

Surikov A.V., Leshenyuk N.S. Determination of building materials's smoke generating characteristics and calculating the visibility in a fire..... 5

Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Kuleshov V.K. Generator of nanosecond pulses of pumping for an active pulse vision system in smoke and calculation of the its action range 20

Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Mordich M.M. Cast-in-place reinforced concrete plate construction as a part of a frame experimental building for fire resistance research 33

Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Nguyen T.K. Results of full-scale fire tests of the monolithic reinforced concrete slab as part of a fragment of a frame building 49

Oshchepkov A.M., Grachulin A.V., Poteryaev Y.K., Ryabtsev V.N., Likhomanov A.O. Improvement of the method of hydraulic calculation of sprinkler automatic fire extinguishing units..... 67

Navrotskiy O.D., Kamlyuk A.N., Grachulin A.V., Likhomanov A.O., Skorupich I.S., Gusarov I.S., Polochanin N.S. Science-based requirements for the design and technical characteristics of the compressed air foam generating systems and their testing technique..... 81

Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Mathematical model for determining the configuration factor when calculating fire risks between buildings with double roofs made of combustible materials 93

Safety in emergencies (technical sciences)

Pastukhov S.M., Osmanov Kh.S., Mikanovich D.S. Normative regulation of water objects safety 104

Civil defense

Bordak S.S. Methodological approach to forecasting and evaluating the situation to support decision-making on the organization of civil defense under the conditions of sabotage-terrorist impact..... 113

Miscellaneous (reviews)

Samsonik A.R., Chumila E.A., Dem'yanov V.V., Popko E.R. Empirical conditionality of physical load and endurance in the fire and rescue professional skills training 124

Rules of submitting articles for publication..... 132

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.5>

УДК 614.841.13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЫМООБРАЗУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАСЧЕТ ВИДИМОСТИ ПРИ ПОЖАРЕ**Суриков А.В., Лешенюк Н.С.**

Цель. Для различных типов материалов изучить зависимость величины коэффициента дымообразования, определенной по стандартизированной методике, от доли сгоревшего материала и длины волны оптического излучения, проходящего через задымленную среду при их горении, и разработать на основе полученных данных скорректированные методики определения величин коэффициента дымообразования и удельного выхода дыма.

Методы. Значения показателя ослабления оптического излучения и доли сгоревшего материала при определении его коэффициента дымообразования определялись экспериментально. Изменение времени потери видимости при пожаре определялось расчетным методом.

Результаты. Экспериментально получены величины показателя ослабления оптического излучения, проходящего через задымленную среду при горении 10 типов материалов, и определены значения коэффициента дымообразования, учитывающие долю массы сгоревшего материала и длину волны излучения. Установлена экспериментальная зависимость изменения показателя ослабления оптического излучения в диапазоне длин волн (400–1100) нм при горении 10 типов материалов. Экспериментально определены значения удельного выхода дыма 10 типов материалов. Показано, что при отсутствии учета доли массы сгоревшего материала и длины волны зондирующего излучения значение коэффициента дымообразования уменьшается до 2,6 раза, что приводит к увеличению расчетного значения времени наступления потери видимости при пожаре до 30 %. Скорректирована методика определения удельного выхода дыма при горении материалов.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть применены при моделировании пожаров и оценке уровня пожарной безопасности людей.

Ключевые слова: моделирование, видимость, дымообразующая способность, удельный выход дыма, показатель ослабления оптического излучения, длина волны зондирующего излучения, доля сгоревшей массы материала.

(Поступила в редакцию 11 января 2021 г.)

Введение

Пожары сопровождаются интенсивным выделением дыма, который является непосредственным объектом таких опасных факторов пожара, как ограниченная видимость и токсичность продуктов горения. Многолетний опыт моделирования пожаров и оценки их динамики показывает, что предельная видимость, как правило, наступает раньше других факторов. Этот фактор зависит от дымообразующей способности пожарной нагрузки, что определяет важность корректности ее учета при проектировании зданий и сооружений, разработке тактики пожаротушения и проведении спасательных работ.

В мировой практике (Европа, США) в качестве количественной характеристики дымообразующей способности материалов используется величина, называемая удельный выход дыма (soot yield) Y_s , которая равна отношению массы дыма m_d к массе сгоревшей пожарной нагрузки m_m [1].

Исходным (прямым) методом определения величины Y_s является метод контроля потока дымовых газов, который заключается в измерении массы дымовых частиц, осаждаемых на фильтре, через который прокачивается дым [2].

Вследствие сложности и трудоемкости данного метода для решения локальных практических задач применяются косвенные оптические методы определения Y_s , основанные на измерении ослабления оптического излучения, проходящего через дым. Как правило, прохождение оптического излучения при определении Y_s фиксируется на длине волны 632 нм [2; 3]. При этом испытательные установки предварительно калибруются по стандартным данным, получаемым прямым методом.

В Республике Беларусь в качестве показателя пожарной опасности веществ и материалов, определяющих их дымообразующую способность, применяется коэффициент дымообразования D_m .

Определение D_m основано на измерении максимального ослабления (показателя ослабления k) лазерного излучения с длиной волны 632 нм при его прохождении через дым и определяется по формуле:

$$D_m = \frac{V}{m_n l} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (1)$$

где D_m – массовый коэффициент дымообразования, м²/кг; V – объем измерительной камеры (0,512 м³), заполненной дымом, м³; m_n – начальная масса материала, кг (определяется площадкой размером 40×40 мм и толщиной материала не более 10 мм (для образцов пенопластов допускается толщина до 15 мм)); l – длина пути прохождения света через дым (0,8 м); I – интенсивность прошедшего света; I_0 – интенсивность падающего света¹.

При пламенном горении зависимость показателя ослабления от времени $k(t)$ имеет максимум вследствие выгорания образца материала с последующим проявлением процессов коагуляции и седиментации частиц дыма, приводящих к уменьшению концентрации частиц дыма и увеличению его прозрачности.

С учетом закона Бугера – Ламберта выражение (1) имеет вид:

$$D_m = \frac{V k}{m_n}, \quad (2)$$

где k – показатель ослабления излучения в среде, м⁻¹.

Как показано в работе [4], величина D_m пропорциональна Y_s :

$$D_m = Y_s \sigma_s, \quad (3)$$

где σ_s – удельный массовый коэффициент экстинкции, м²/кг.

Однако выражение (3) будет справедливо только при полном сгорании испытуемого образца, т.к. при определении Y_s учитывается доля сгоревшего материала, идущего на образование дыма.

В ряде случаев в условиях испытаний по определению D_m наблюдается неполное сгорание исследуемых образцов при достижении максимального значения показателя ослабления k светового потока, принимаемого для расчета D_m согласно формуле (1). При неполном сгорании материалов значения Y_s , рассчитанные с использованием измеренной величины D_m , будут занижены. Это, несомненно, будет влиять на результаты расчета значений опасных факторов пожара, в частности, приведет к увеличению значения предельной видимости l_{np} в дыму. Следовательно, для корректного определения величины D_m необходимо в процессе испытаний устанавливать долю сгоревшего материала $A_{дсм}$.

При проектировании зданий и сооружений для расчета предельной видимости при пожаре l_{np} применяются интегральная, зонная и полевая модели развития пожара. Расчет значения l_{np} в данных моделях основан на определении концентрации дыма, при которой на соответствующем расстоянии объект наблюдения (например, эвакуационный выход) становится неразличимым. Значение l_{np} рассчитывается исходя из величины яркостного порога чувствительности человеческого глаза в условиях задымления.

При проведении расчетов задымления в помещении в интегральной модели в качестве значений дымообразующей способности пожарной нагрузки D , как правило, используется или база типовой пожарной нагрузки [5], или значения коэффициентов дымообразования различных материалов D_m , полученные в условиях испытаний по стандартизированной методике ГОСТ². В зонной и полевой модели развития пожара в качестве параметра пожарной нагрузки, характеризующего дымообразующую способность материала, применяется Y_s .

¹ Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: ГОСТ 12.1.044-89. – Взамен ГОСТ 12.1.044-84; введ. 17.12.92. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – С. 74–76.

² См. сноску 1.

Прямое применение данных по D_m и Y_s (при определении D_m по стандартизированной методике ГОСТ и Y_s по формуле (3)) для расчета предельной видимости при пожаре l_{np} имеет методическую ошибку, связанную с длиной волны зондирующего излучения λ при определении D_m .

Основным моментом, который должен быть учтен при расчете видимости, является корректное применение значений удельного массового коэффициента экстинкции σ_s . Удельный массовый коэффициент экстинкции σ_s численно равен показателю ослабления оптического излучения при единичной массовой концентрации дыма. Он зависит от горящего материала и длины волны света, проходящего через дым λ [6].

Влияние изменения σ_s в зависимости от материала пожарной нагрузки на расчет предельной видимости рассмотрено в работе [7]. Результаты экспериментальных исследований по определению σ_s , полученные в семи различных научно-исследовательских лабораториях, систематизированы в работе [8]. В указанной работе представлены значения σ_s для 17 веществ и материалов при зондировании дыма, образованного при их горении, оптическим излучением с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм. На практике для оценки видимости при пожаре применяется усредненное значение σ_s , равное $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$ на длине волны $632,8$ нм с доверительным интервалом $\pm 1170 \text{ м}^2/\text{кг}$ и доверительной вероятностью 95 %. Данное значение принимается независимо от природы и происхождения материала [1; 9; 10].

Известно, что человеческий глаз неодинаково чувствителен к излучению различных длин волн. Наибольшая его чувствительность соответствует желто-зеленому цвету, т.е. диапазону длин волн $550\text{--}570$ нм. Эти значения соответствуют дневному зрению человека. В работе [11] установлено, что условия задымления соответствуют условиям сумеречного зрения. Этот вид зрения человека характеризуется смещением максимальной чувствительности глаза в голубую область спектра. При этом максимальное ее значение соответствует диапазону длин волн $505\text{--}515$ нм. Данное явление носит название эффекта Пуркинье. Зависимость относительной спектральной световой чувствительности глаза человека V от длины волны излучения λ приведена на рисунке 1 [12]. С учетом того что при определении предельной видимости расчет проводится для предельной чувствительности глаза, определение параметров дымообразования пожарной нагрузки с применением оптических методов необходимо проводить именно на длине волны зондирующего излучения, соответствующей максимальной чувствительности глаза.

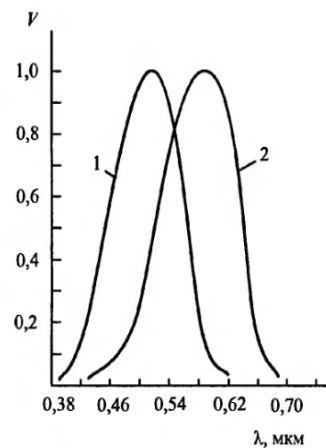


Рисунок 1. – Кривая видимости для сумеречного (1) и дневного (2) зрения

Так как величина предельной видимости l_{np} при задымлении определяется максимальной чувствительностью глаза для сумеречного зрения, т.е. при длине волны $\lambda = 505\text{--}515$ нм, при расчете l_{np} следует использовать значения коэффициента дымообразования D_m и удельного массового коэффициента экстинкции σ_s , соответствующие данному диапазону длин волн излучения.

В данной работе описана скорректированная методика определения величины удельного выхода дыма Y_s , основанная на стандартизированной методике определения коэффициента дымообразования D_m и дополненная учетом доли сгоревшего материала $A_{осм}$ и значения удельного массового коэффициента экстинкции σ_s от вида горящего материала. Представлены результаты экспериментального исследования зависимости значений коэффициента дымообразования D_m и удельного массового коэффициента экстинкции σ_s от длины волны оптического излучения для различных типов пожарной нагрузки.

Основная часть

Учет доли сгоревшего материала при определении дымообразующей способности материалов. Экспериментальные исследования проводились на базе Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» на испытательной установке «Дым» (сертификат аккредитации рег. № ВУ/112 1.0102 от 19.03.1996)³.

³ См. сноску 1.

Методика измерений основывалась на регистрации в условиях стандартных испытаний максимального ослабления лазерного излучения, проходящего через дым, полученный при горении исследуемого материала, и соответствовала ГОСТ⁴. В качестве приемника излучения применялся фотодиод ФД-7К ($\Delta\lambda = 400\text{--}1100$ нм). Результаты измерений интенсивности лазерного излучения фиксировались каждые 3 с на персональном компьютере.

Для выбора исследуемых материалов были проанализированы результаты испытаний более 500 материалов, полученные на базе научно-исследовательских учреждений Министерства по чрезвычайным ситуациям [13]. По результатам анализа были определены материалы, при горении которых максимально ослабляется оптическое излучение, проходящее через образующийся при этом дым.

Для исследований были выбраны следующие материалы: древесина хвойных пород (далее – древесина), древесностружечная плита (далее – ДСП), древесно-волоконная плита средней плотности (далее – МДФ), фанера, ориентированно-стружечная плита (далее – OSB-плита), пенополистирол марки «ППТ» (далее – ППТ), поливинилхлорид (далее – ПВХ), полиэтилен (далее – ПЭТ), пенополиуретан (далее – ППУ), резина.

В процессе экспериментов испытания прекращались в момент достижения максимума поглощения оптического излучения. Образцы взвешивались до и после испытаний для определения доли сгоревшей массы $A_{\text{дсм}}$. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты измерений доли сгоревшего материала

Материал	Средняя начальная масса, г	Средняя сгоревшая масса, г	Средняя доля сгоревшего материала, отн. ед.
ППУ	$0,65 \pm 0,01$	$0,65 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
ПВХ	$3,37 \pm 0,01$	$1,77 \pm 0,05$	$0,52 \pm 0,01$
Фанера	$3,65 \pm 0,01$	$3,44 \pm 0,03$	$0,94 \pm 0,01$
Древесина	$3,55 \pm 0,01$	$3,10 \pm 0,03$	$0,87 \pm 0,01$
МДФ	$7,30 \pm 0,01$	$5,86 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,01$
ДСП	$3,28 \pm 0,01$	$2,79 \pm 0,03$	$0,85 \pm 0,01$
ППТ	$0,40 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
ПЭТ	$0,85 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
Резина	$2,50 \pm 0,01$	$1,17 \pm 0,03$	$0,47 \pm 0,01$
OSB-плита	$7,40 \pm 0,01$	$6,24 \pm 0,03$	$0,84 \pm 0,01$

Сравнение полученных результатов с известными данными [14; 15] показало, что они практически идентичны, отличие доли сгоревшего материала для исследованных материалов по сравнению с результатами работ [14; 15] находится в пределах 1–2 %.

Проведенные исследования доли сгоревшего материала $A_{\text{дсм}}$ при определении коэффициента дымообразования позволяют сделать следующие выводы:

1. Для ряда синтетических полимерных материалов (ППТ, ППУ и ПЭТ) характерно полное выгорание ($A_{\text{дсм}} = 1$) до момента достижения максимального ослабления оптического излучения, проходящего через образованный при их горении дым.

2. Исследуемые образцы ПВХ и резины образовывали негорючий остаток. По всей видимости, это связано с наличием в исследуемых образцах негорючих соединений (например, SiO_2 , CaCl_2 , КОН и др.).

Следует отметить, что на стадии предварительных исследований в качестве ПВХ изделия нами применялась ПВХ-панель [4], а в результатах, представленных в таблице 1, – ПВХ-короб, применяемый для прокладки электрической проводки. При этом в первом случае доля сгоревшего материала $A_{\text{дсм}}$ составляла $0,75 \pm 0,03$, а рассматриваемом случае – $0,52 \pm 0,01$. Вместе с тем ослабление интенсивности излучения при горении указанных образцов было сопоставимо. Для ПВХ-панели оно составляло около 83 %, а для ПВХ-короба – около 75 %. Средняя масса сгоревшей ПВХ-панели превышала аналогичный параметр ПВХ-короба примерно на 10 %. Таким образом, для изделий из ПВХ доля массы сгоревшего материала $A_{\text{дсм}}$ при достижении максимального ослабления оптического излучения, проходящего через образованный при их горении дым, может варьироваться в достаточно широком диапазоне (50–80 % от начальной массы).

Меньшая доля сгоревшей массы для ПВХ-короба обусловлена его областью применения и внесением в полимерную композицию материала специальных металлосодержащих

⁴ См. сноску 1.

добавок, снижающих его пожарную опасность вследствие уменьшения скорости распространения пламени. Однако, как показали наши исследования, в условиях пламенного горения ослабление интенсивности оптического излучения, а следовательно, и значения коэффициентов дымообразования ПВХ-коробов и изделий, в которых указанные добавки отсутствуют, будут сопоставимы.

3. Древесина и изделия из нее (за исключением фанеры) имеют практически одинаковое значение доли сгоревшего материала $A_{дсм}$, составляющего 0,80–0,85 от начальной массы образцов. Вместе с тем наблюдается увеличение доли сгоревшего материала при уменьшении толщины изделия. Например, для исследованных образцов OSB-панели (толщина – 9,0 мм) значение $A_{дсм}$ составило $0,84 \pm 0,01$, а для образцов древесины (толщина образцов – 5,0 мм) – $0,87 \pm 0,01$. Наиболее выражен данный эффект при горении фанеры (толщина образцов – 4,0 мм, толщина слоев – около 1,3 мм) – $A_{дсм} = 0,94 \pm 0,01$. Особенностью горения этого материала являлось резкое «вскрытие» слоев образца, обусловленное его неоднородностью (наличием более тонких слоев исходного материала). После чего происходит одновременное горение всех слоев фанеры. Полученные значения $A_{дсм}$ для исследованных образцов фанеры ($0,94 \pm 0,01$) практически совпадают со значением $A_{дсм}$ для картона, равным $0,96 \pm 0,03$ согласно работам [14; 15].

Экспериментальные исследования ослабления интенсивности оптического излучения в зависимости от длины волны. Зависимость ослабления интенсивности оптического излучения в дыму от длины волны определяется соответствующей зависимостью удельного массового коэффициента экстинкции σ_s . Как следует из выражений (2), (3):

$$k = \sigma_s(\lambda) \cdot C_d, \quad (4)$$

где C_d – концентрация дыма,

$$C_d = \frac{m_d}{V} = \frac{m_n}{V} A_{дсм} Y_s. \quad (5)$$

Следовательно, при одинаковой величине пожарной нагрузки m_n относительная величина удельного массового коэффициента экстинкции $\sigma_s(\lambda_i)$ будет равна отношению показателей ослабления (экстинкции) излучения k на измеряемой λ_i и базовой λ_0 длинах волн:

$$\frac{\sigma_s(\lambda_i)}{\sigma_s(\lambda_0)} = \frac{k(\lambda_i)}{k(\lambda_0)} = \frac{D_m(\lambda_i)}{D_m(\lambda_0)}. \quad (6)$$

Измерения показателя экстинкции k на различных длинах волн были проведены на экспериментальной установке «Дым». В качестве источников света применялись полупроводниковые лазерные модули (SJ010 ($\lambda = 405 \pm 10$ нм), s-12 ($\lambda = 532 \pm 5$ нм), DSL6505-0921 ($\lambda = 650 \pm 5$ нм), s-13 ($\lambda = 850 \pm 2$ нм), KLM-D980-5-5 ($\lambda = 980 \pm 5$ нм)) мощностью 3–5 мВт. Для каждого исследуемого материала последовательно проводились серии из 5 опытов для каждой длины волны. Погрешность определения величины $\sigma_s(\lambda_i)$ определяется погрешностью измерения $k(\lambda_i)$ и погрешностью приготовления образцов пожарной нагрузки одинаковой массы. Образцы исследуемых материалов готовились с погрешностью по начальной массе не более 0,01 г. Данная точность была определена на стадии предварительных экспериментов и позволяла обеспечить погрешность конечных результатов не более 15 % (т.е. соответствовала требованиям метода ГОСТ⁵). Показатель ослабления k определялся согласно закону Бугера – Ламберта. Результаты полученных экспериментальных данных приведены в таблице 2.

Графически полученные результаты представлены на рисунке 2. На графиках показаны отношения средних значений показателя ослабления k_λ , полученные на длинах волн 405, 532, 850 и 980 нм, к среднему показателю ослабления на длине волны 650 нм – k_{650} . Это обусловлено тем, что для наиболее близкой к длине волны, равной 632,8 нм, известно усредненное значение удельного массового коэффициента экстинкции σ_s (8700 ± 1170 м²/кг) [9]. Таким образом, зная соотношение показателя ослабления на длине волны k_λ/k_{650} в исследуемом диапазоне, можно определить соответствующее соотношение значений удельного массового коэффициента экстинкции $\sigma_s(\lambda)/\sigma_s(650)$.

⁵ См. сноску 1.

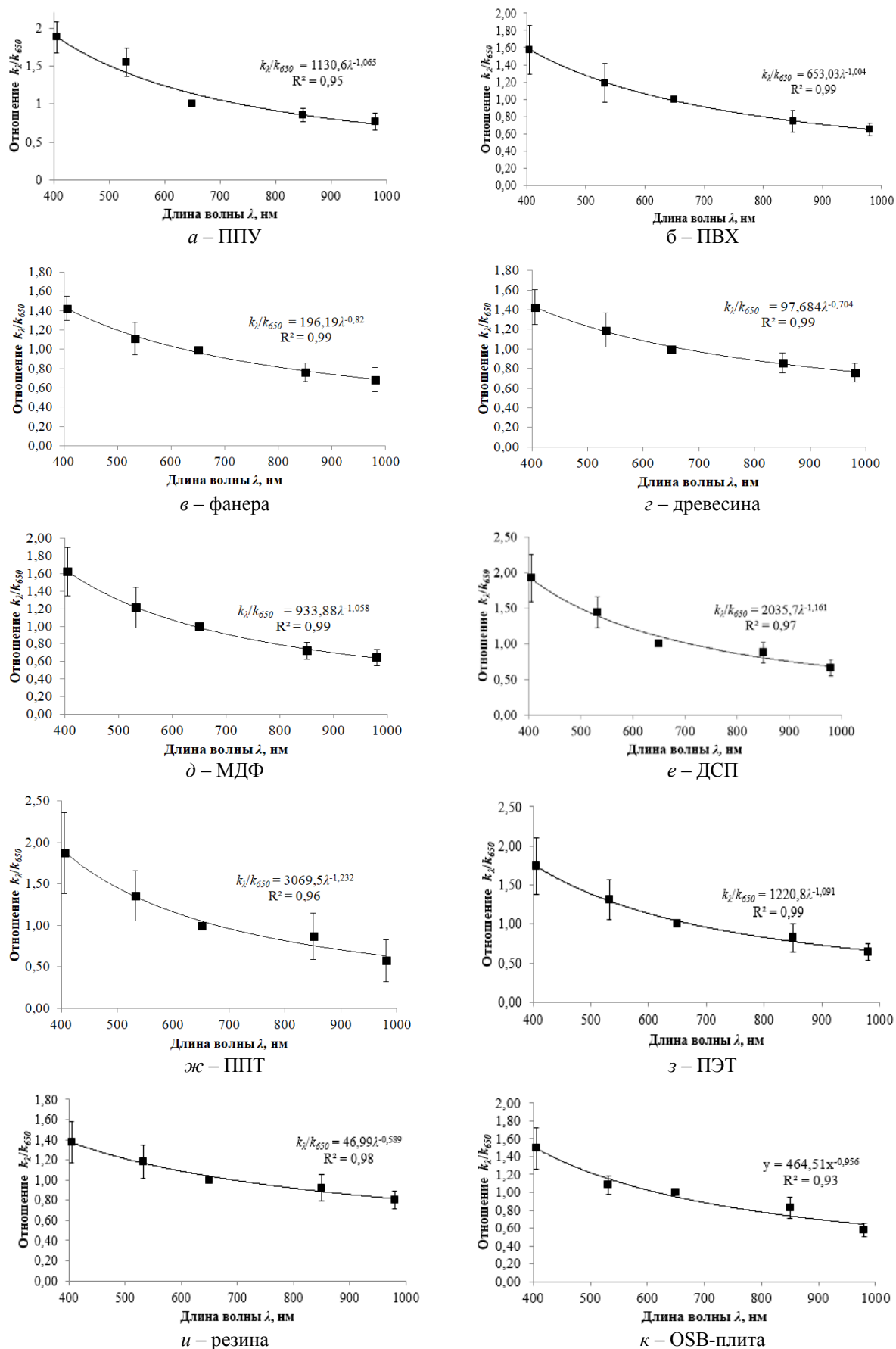


Рисунок 2. – Зависимости отношения показателя ослабления оптического излучения k_{λ} (405, 532, 850 и 980 нм) к показателю ослабления k_{650} для исследованных материалов

Таблица 2. – Значения показателя ослабления оптического излучения k при различных длинах волн зондирующего излучения

Материал	Показатель ослабления оптического излучения k при длине волны зондирующего излучения, м ⁻¹				
	405 нм	532 нм	650 нм	850 нм	980 нм
ППУ	0,34 ± 0,01	0,28 ± 0,03	0,18 ± 0,01	0,16 ± 0,01	0,14 ± 0,02
ПВХ	2,64 ± 0,14	1,98 ± 0,31	1,67 ± 0,18	1,24 ± 0,17	1,08 ± 0,03
Фанера	0,92 ± 0,02	0,72 ± 0,10	0,64 ± 0,04	0,49 ± 0,05	0,44 ± 0,07
Древесина	0,67 ± 0,02	0,56 ± 0,06	0,47 ± 0,08	0,41 ± 0,03	0,36 ± 0,03
МДФ	1,63 ± 0,07	1,22 ± 0,18	1,00 ± 0,12	0,73 ± 0,05	0,65 ± 0,05
ДСП	1,08 ± 0,11	0,81 ± 0,06	0,56 ± 0,08	0,49 ± 0,04	0,37 ± 0,04
ППТ	0,57 ± 0,03	0,41 ± 0,03	0,30 ± 0,06	0,26 ± 0,06	0,17 ± 0,07
ПЭТ	0,66 ± 0,03	0,49 ± 0,06	0,38 ± 0,06	0,31 ± 0,05	0,24 ± 0,02
Резина	2,15 ± 0,08	1,85 ± 0,18	1,57 ± 0,16	1,44 ± 0,15	1,26 ± 0,05
OSB-плита	1,45 ± 0,07	1,05 ± 0,03	0,97 ± 0,08	0,80 ± 0,09	0,56 ± 0,06

Анализ полученных данных показал, что в исследуемом диапазоне длин волн зависимости в целом идентичны для всех исследованных материалов и подчиняются зависимости вида:

$$k_{\lambda}/k_{650} = A_1 \lambda^{-A_2}, \quad (7)$$

где A_1 и A_2 – коэффициенты, определяемые согласно таблице 3.

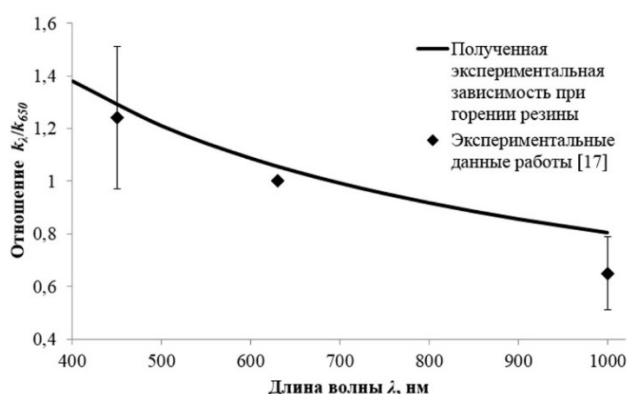
Таблица 3. – Значения коэффициентов A_1 и A_2 для исследованных материалов

Материал	Коэффициент A_1	Коэффициент A_2
ППУ	1130,6	1,065
ПВХ	653,0	1,004
Фанера	196,2	0,820
Древесина	97,7	0,704
МДФ	933,9	1,058
ДСП	2035,7	1,161
ППТ	3069,5	1,232
ПЭТ	1220,8	1,091
Резина	47,0	0,589
OSB-плита	464,5	0,956

Для проверки справедливости полученных результатов было проведено сравнение их с данными работы [16] (рис. 3).

Экспериментальные данные, приведенные в указанной работе, соответствуют теоретическим расчетным значениям, полученным ее авторами на основании теории Ми для горения сырой нефти. В качестве материала для сравнения была выбрана резина, т.к. средние размеры частиц дыма при ее горении максимально приближены к размерам частиц дыма, образующихся при горении нефти.

Полученные зависимости изменения показателя ослабления k от длины волны оптического излучения, проходящего через задымленную среду при горении различных материалов, позволяют определять значения коэффициента дымообразования D_m с учетом максимальной чувствительности глаза человека (505 нм) в условиях задымления, т.е. сумеречного зрения. Отношение показателя ослабления на длине волны 505 нм k_{505} к показателю ослабления на стандартизированной длине волны 632 нм k_{632}

**Рисунок 3. – Экспериментальная зависимость показателя ослабления оптического излучения k_{λ} , приведенного к показателю ослабления на длине волны 650 нм k_{650} , при горении резины в сравнении с экспериментальными данными работы [17]**

согласно зависимости (7) составляет 1,15–1,30. Представленная в формуле (7) зависимость позволяет прогнозировать изменение показателя ослабления оптического излучения и удельного массового коэффициента экстинкции σ_s в диапазоне 400–1100 нм.

Анализ полученных экспериментальных данных. Зависимость D_m от длины волны зондирующего излучения λ обусловлена тем, что удельный массовый коэффициент экстинкции является функцией λ . Исходя из полученных значений доли сгоревшей массы исследованных материалов $A_{дсм}$ и зависимостей $\sigma_{s(\lambda)}/\sigma_{s(650)}$ был проведен расчет значений D_m для длины волны, соответствующей максимуму чувствительности глаза человека в условиях задымления.

В таблице 4 приведены значения D_m , полученные по формуле (1) без учета доли сгоревшей массы материала $A_{дсм}$ и при длине волны зондирующего излучения $\lambda = 650$ нм, и значения D_m , рассчитанные с учетом доли сгоревшей массы материала $A_{дсм}$ и при длине волны зондирующего излучения $\lambda = 505$ нм.

Из таблицы 4 видно, что значения D_m , определенные с учетом доли сгоревшей массы материала $A_{дсм}$ при длине волны зондирующего излучения $\lambda = 505$ нм, значительно больше значений D_m , определенных по стандартной методике ГОСТ⁶. Например, отношение указанных значений для ПВХ и резины составляет 2,4 и 2,6 соответственно.

При моделировании динамики задымления в помещениях в условиях пожара заниженная величина D_m приведет к увеличению времени установления критического значения расстояния предельной видимости и, соответственно, к уменьшению реальной вероятности воздействия на человека опасных факторов пожара при его возникновении.

Таблица 4. – Результаты расчетов коэффициента дымообразования D_m

Материал	Коэффициент дымообразования D_m , м ² /кг		
	при начальной массе m и $\lambda = 632$ нм	при сгоревшей массе Δm и $\lambda = 505$ нм	увеличение, раз
ППУ	144	215	1,5
ПВХ	253	611	2,4
Фанера	90	114	1,3
Древесина	68	95	1,4
МДФ	70	113	1,6
ДСП	88	151	1,7
ППТ	386	559	1,5
ПЭТ	227	311	1,4
Резина	321	826	2,6
OSB-плита	67	96	1,4

Для оценки влияния рассматриваемых изменений значений D_m на время критической продолжительности пожара по потере видимости была проведена серия расчетов согласно методике ГОСТ⁷. При постоянных параметрах помещения и пожарной нагрузки варьировалось значение коэффициента дымообразования D_m – проводилось его последовательное увеличение до 2,6 раза от начального значения. Уменьшение расчетного времени наступления потери видимости в условиях пожара при отсутствии учета массы сгоревшего материала Δm и длины волны зондирующего излучения при определении коэффициента дымообразования D_m составляет около 30 %. Таким образом, при отсутствии учета доли сгоревшей массы материала при определении его коэффициента дымообразования и спектральной чувствительности глаза (т.е. длины волны зондирующего излучения при определении коэффициента дымообразования) расчетное время наступления критической видимости при пожаре будет завышено. Данная методическая погрешность может достигать значения до 30 %. Следовательно, условия безопасной эвакуации не могут быть обеспечены.

⁶ См. сноску 1.

⁷ Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Взамен ГОСТ 12.1.004-85; введ. 17.12.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 88 с.

Методика определения удельного выхода дыма. На основании формулы (3) и проведенных исследований по установлению доли сгоревшего материала при определении коэффициента дымообразования D_m может быть определена величина удельного выхода дыма Y_s исходя из значения D_m , определяемого по стандартной методике⁸:

$$Y_s = \frac{D_m}{A_{дсм} \sigma_s}. \quad (8)$$

Проведенные исследования, представленные в данной работе, а также результаты работы [7] позволили сформулировать методику определения величины удельного выхода дыма Y_s на основании результатов экспериментов по определению коэффициента дымообразования D_m с учетом доли сгоревшего материала $A_{дсм}$ при достижении максимума ослабления оптического излучения и значения удельного массового коэффициента экстинкции σ_s для различных видов материалов.

Методика определения величины удельного выхода дыма Y_s включает следующие операции:

1. Определить ослабление оптического излучения, проходящего через образованный при пламенном горении материала дым, и долю сгоревшего материала $A_{дсм}$ в условиях стандартных испытаний при расчете коэффициента дымообразования D_m согласно методике ГОСТ⁹.

2. Определить согласно справочным данным или расчетным способом значение удельного массового коэффициента экстинкции σ_s для заданного материала. В случае отсутствия данных по σ_s принять его равным 8700 м²/кг (при $\lambda = 632$ нм).

3. Произвести расчет удельного выхода дыма Y_s согласно формуле (8).

Для проверки корректности разработанной методики было проведено сравнение полученных результатов Y_s с данными работы [17], в которой наиболее полным образом представлены значения Y_s , полученные зарубежными исследователями. Расчетные значения Y_s представлены с учетом результатов работы [8] по определению значений σ_s для конкретных материалов. Результаты приведены в таблице 5. В таблице для сравнения приведены результаты расчетов Y_s , выполненных по общепринятому выражению (3) (т.е. D_m определен для начальной массы образцов и $\sigma_s = 8700$ м²/кг).

Таблица 5. – Значения удельного выхода согласно разработанной методике в сравнении с общепринятой методикой его определения и данными из литературных источников

Материал	Удельный выход дыма Y_s , рассчитанный по общепринятому выражению (3)	Расчет по разработанной методике			Удельный выход дыма Y_s согласно источнику [18]
		Коэффициент дымообразования D_m , м ² /кг	Удельный массовый показатель экстинкции σ_s , м ² /кг [8]	Удельный выход дыма Y_s	
ППУ	0,017	144	8100	0,018	0,131–0,227
ПВХ	0,029	484	9500	0,051	0,076–0,098
Фанера	0,010	96	8100	0,012	0,015
Древесина	0,008	78	8100	0,010	0,015
МДФ	0,008	87	8100	0,011	0,015
ДСП	0,010	103	8100	0,013	0,015
ППТ	0,044	386	9800	0,039	0,164
ПЭТ	0,026	227	8800	0,026	0,056–0,102
Резина	0,037	685	10300	0,067	0,078
OSB-плита	0,008	80	8100	0,010	0,015

Проведенное сравнение свидетельствует о хорошем совпадении полученных результатов с имеющимися данными в литературных источниках. Отличие данных по Y_s , полученных по разработанной методике, от известных значений Y_s составляют 13–33 %. При этом значения Y_s , рассчитанные по общепринятому выражению (3), отличаются от известных значений Y_s [17] на 35–63 %. Некоторое отличие полученных нами экспериментальных данных

⁸ См. сноску 1.

⁹ См. сноску 1.

от приведенных в работе [17] по ряду синтетических полимеров (полиэтилен, пенополиуретан и полистирол) может объясняться наличием различных добавок в исходных материалах для придания им определенных свойств.

Дополнительная верификация представленной методики определения Y_s и σ_s осуществлена посредством полевой модели развития пожара. В программном комплексе FDS [1] была разработана модель стандартизированной по ГОСТ¹⁰ установки по определению коэффициента дымообразования D_m (рис. 4). Далее было проведено моделирование выполненных экспериментальных исследований для полученных согласно выражению (3) и разработанной методике значений Y_s .

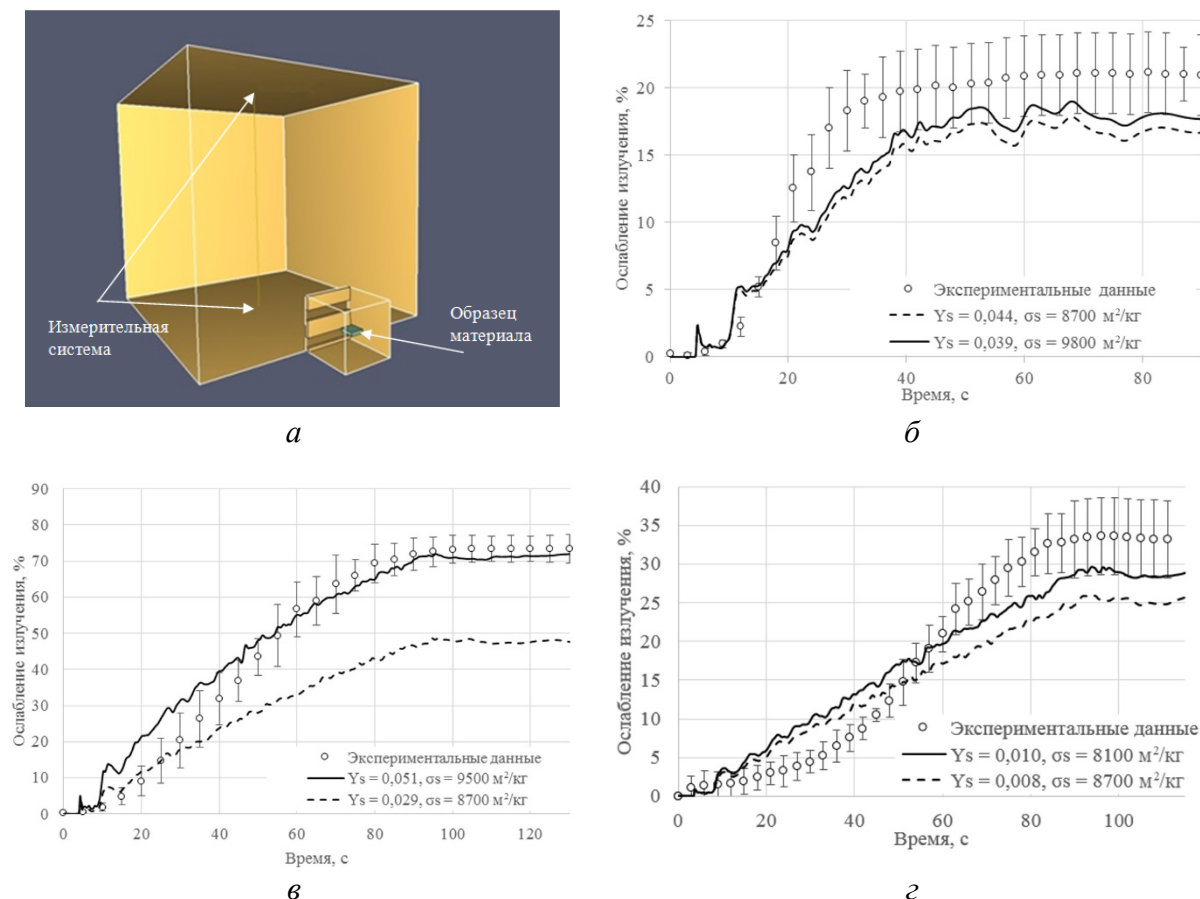


Рисунок 4. – Модель установки по определению коэффициента дымообразования (а) и результаты моделирования ослабления проходящего через дым оптического излучения в сравнении с экспериментальными данными для материалов: ППТ (б), ПВХ (в), древесина (г)

В качестве материалов для моделирования были приняты ППТ и ПВХ как образцы синтетических полимеров, у которых максимально отличается доля сгорания материала $A_{\text{дсм}}$ при определении их коэффициента дымообразования D_m , а в качестве целлюлозосодержащих материалов была принята древесина. Значения исходных параметров моделирования приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Входные данные для моделирования

Параметр	Значение параметров					
Материал	Древесина		ПВХ		ППТ	
Плотность, кг/м ³	450		1250		20	
Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	1,6		0,9		1,7	
Удельная теплопроводность, Вт/м·К	0,14		0,20		0,04	
Удельная массовая скорость выгорания, кг/м ² ·с	0,015		0,024		0,012	
Удельный массовый коэффициент экстинкции, м ² /кг	8700	8100	8700	9500	8700	9800
Удельный выход дыма	0,008	0,010	0,029	0,051	0,044	0,039

¹⁰ См. сноску 1.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования и экспериментальные данные по определению ослабления оптического излучения при его прохождении через дым.

Сравнение данных, полученных при моделировании, с экспериментальными значениями показывает, что лучшее совпадение имеют результаты расчета при Y_s , определенном по разработанной методике. Отклонение значений ослабления излучения при моделировании для указанных значений Y_s от экспериментальных данных составляет 2–12 %. При этом отклонение значений при Y_s , определенных по общепринятому выражению (3), находится в диапазоне 14–36 %. Таким образом, разработанная методика позволяет повысить точность определения ослабления оптического излучения в 2–3 раза по сравнению с общепринятым подходом.

Заключение

1. Экспериментально определены значения коэффициента $A_{дсм}$, описывающего долю массы сгоревшего материала в экспериментах по определению коэффициента дымообразования D_m . Отличие доли сгоревшего материала для исследованных материалов по сравнению с данными, приведенными в литературных источниках, находится в пределах 1–2 %. Для ряда синтетических полимерных материалов (пенополистирол, пенополиуретан, полиэтилен) характерно полное выгорание при определении их коэффициентов дымообразования. Значение $A_{дсм}$ для синтетических полимеров, склонных при горении к образованию коксового остатка, составляет 0,50–0,75. Природные полимерные и композиционные (на основе древесины) материалы имеют значения $A_{дсм}$ равные 0,80–0,85. При этом с уменьшением толщины материала наблюдается увеличение значения $A_{дсм}$. Для слоистых материалов (например, фанеры с толщиной слоя около 1,3 мм) $A_{дсм}$ составляет 0,95.

2. Получены экспериментальные зависимости изменения показателя ослабления оптического излучения k , проходящего через задымленную среду при горении 10 различных материалов от длины волны излучения, позволяющие определять коэффициент дымообразования D_m с учетом максимальной чувствительности глаза человека в условиях задымления. Отношение показателя ослабления на длине волны 505 нм k_{505} к показателю ослабления на стандартизированной длине волны 632 нм k_{632} согласно зависимости (4) составляет 1,15–1,30.

3. Показано, что при отсутствии учета $A_{дсм}$ и длины волны зондирующего излучения значение коэффициента дымообразования D_m уменьшается до 2,6 раза, что приводит к увеличению расчетного значения времени наступления потери видимости при пожаре до 30 %.

4. Разработана методика определения удельного выхода дыма Y_s на основании результатов экспериментов по определению коэффициента дымообразования D_m , учитывающая долю сгоревшего материала $A_{дсм}$ при достижении максимума ослабления оптического излучения и зависимость удельного массового коэффициента экстинкции σ_s от вида материалов.

5. Экспериментально определены значения удельного выхода дыма для древесины хвойных пород, древесностружечной плиты, древесно-волокнуистой плиты средней плотности, фанеры, ориентированно-стружечной плиты, пенополистирола, поливинилхлорида, полиэтилена, пенополиуретана и резины. Проведенное сравнение полученных согласно разработанной методике значений Y_s с имеющимися данными в литературных источниках свидетельствует о хорошем совпадении полученных результатов (отличие полученных данных составляет 13–33 %).

6. Для верификации разработанной методики определения удельного выхода дыма в полевой модели развития пожара в программном комплексе FDS разработана модель стандартизированной установки по определению коэффициента дымообразования. Проведено моделирование экспериментальных исследований по определению ослабления оптического излучения при его прохождении через дым. Установлено, что разработанная методика позволяет повысить точность определения Y_s в 2–3 раза по сравнению с методикой, основанной на ГОСТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fire dynamics simulator (Version 5). User's Guide [Electronic resource] / K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd. – Washington: U.S. NIST, 2007. – Mode of access: http://fire.fsv.cvut.cz/ifer/2014-Training_school/Materials%20to%20software%20courses/FDS/FDS_5_User_Guide.pdf – Date of access: 16.02.2014.
2. Mulholland, G.W. The Effect of Scale on Smoke Emission / G.W. Mulholland, V. Henzel, V. Babrauskas // Fire Safety Science: Proceedings of the Second International Symposium, Tokyo, June 13–17,

1988. / Science University of Tokyo; ed.: T. Wakamatsu [et al.]. – New York: Hemisphere Publishing Corp., 1989. – Pp. 347–357.
3. Mulholland, G.W. Generation and Transport of Smoke Components / K.M. Butler, G.W. Mulholland // Fire Technology. – 2004. – Vol. 40. – P. 149–176. DOI: 10.1023/B:FIRE.0000016841.07530.64.
 4. Суриков, А.В. Определение значений параметров моделирования и интерпретация выходных данных в программном комплексе FDS при расчете видимости в условиях задымления / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 308–319. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.308.
 5. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
 6. Mulholland, G.W. Smoke Production and Properties / G.W. Mulholland // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed.: P.J. DiNenno [et al.]. – 4th ed. – Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. – Chapter 13. – Pp. 2-291 – 2-302.
 7. Суриков, А.В. Расчет видимости в помещениях в условиях пожара с применением программного комплекса FDS / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 147–160. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.147.
 8. Mulholland, G.W. Specific extinction coefficient of flame generated smoke / G.W. Mulholland, C. Croarkin // Fire and Materials. – 2000. – Vol. 24, Iss. 5. – P. 227-230. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-9.
 9. Mulholland, G.W. Design and Testing of a New Smoke Concentration Meter / G.W. Mulholland, E.L. Johnsson, M.G. Fernandez, D.A. Shear // Fire and Materials. – 2000. – Vol. 24, Iss. 5. – P. 231–243. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-N.
 10. Работа в программном комплексе FireCat. Библиотека реакций и поверхностей горения в PyroSim [Электронный ресурс] // PyroSim. – Режим доступа: https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf – Дата доступа: 30.11.2017.
 11. Зотов, Ю.С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода необходимого времени эвакуации людей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Ю.С. Зотов. – М., 1989. – 273 л.
 12. Тарасов, В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа: монография / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушников. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
 13. Суриков, А.В. Количественная оценка ослабления оптического излучения, проходящего через задымленную среду / А.В. Суриков, Н.С. Лешенюк, В.О. Петухов // Вестник КИИ МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 2 (14). – С. 14–18.
 14. Трушкин, Д.В. Совершенствование методологии определения пожарной опасности строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Д.В. Трушкин. – М., 2004. – 226 л.
 15. Кочкин, А.Ю. Прогнозирование и контроль экологической опасности дымов: дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16 / А.Ю. Кочкин. – Братск, 2006. – 160 л.
 16. Dobbins, R.A. Comparison of fractal smoke optics model with light extinction measurement / R.A. Dobbins, G.W. Mulholland, N.P. Bryner // Atmospheric Environment. – 1994. – Vol. 28, Iss. 5. – P. 889–897. DOI: 10.1016/1352-2310(94)90247-X.
 17. Tewarson, A. Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fire / A. Tewarson // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / ed.: P.J. DiNenno [et al.]. – 4th ed. – Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. – Chapter 3. – Pp. 3-109 – 3-195.

**Определение характеристик дымообразующей способности строительных материалов
и расчет видимости при пожаре**

**Determination of building materials's smoke generating characteristics
and calculating the visibility in a fire**

Суриков Андрей Валерьевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра организации
службы, надзора и правового обеспечения

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

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Andrey V. Surikov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Organization of Service, Supervision
and Law Support, Head of the Chair

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

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Лешенюк Николай Степанович

доктор физико-математических наук,
профессор

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

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

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

Nikolay S. Leshenyuk

Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

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

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

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.5>

DETERMINATION OF BUILDING MATERIALS'S SMOKE GENERATING CHARACTERISTICS AND CALCULATING THE VISIBILITY IN A FIRE

Surikov A.V., Leshenyuk N.S.

Purpose. For various types of materials, to study the dependence of the value of the smoke production coefficient, determined according to a standardized method, on the fraction of burnt material and the wavelength of optical radiation passing through smoke-filled environment during their combustion; based on the data obtained to develop corrected methods for determining the values of the smoke production coefficient and smoke yield.

Methods. The values of the attenuation coefficient and the fraction of burnt material in determining its smoke production coefficient were determined experimentally. The change of the time of visibility loss at a fire was determined by a calculation method.

Findings. The values of the attenuation coefficient of optical radiation passing through a smoke-filled environment during the combustion of 10 types of materials were experimentally obtained and the values of the smoke production coefficient were determined, taking into account the fraction of the mass of the burnt material and the radiation wavelength. An experimental dependence of the change in the attenuation index of optical radiation in the wavelength range (400–1100) nm during the combustion of 10 types of materials has been established. The values of smoke yield of 10 types of materials have been determined experimentally. It is shown that without taking into account the fraction of the mass of the burnt material and the wavelength of the probing radiation, the value of the smoke production coefficient decreases by 2.6 times, which leads to an increase in the calculated value of estimated time of onset of visibility loss at a fire up to 30 %. The method for determining the smoke yield during materials combustion has been corrected.

Application field of research. The results can be applied in modeling fires and fire risk assessment.

Keywords: modeling, visibility, smoke-generating ability, smoke yield, attenuation coefficient of optical radiation, radiation wavelength, fraction of burnt material mass.

(The date of submitting: January 11, 2021)

REFERENCES

1. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J. Fire dynamics simulator (Version 5). User's Guide, available at: http://fire.fsv.cvut.cz/ifer/2014-Training_school/Materials%20to%20software%20courses/FDS/FDS_5_User_Guide.pdf (accessed: February 16, 2014).
2. Mulholland G.W., Henzel V., Babrauskas V. The Effect of Scale on Smoke Emission. *Proc. of the Second International Symposium «Fire Safety Science», Tokyo, June 13–17, 1988*. Science University of Tokyo. Ed. by: T. Wakamatsu et al. New York, 1989. Pp. 347–357.
3. Mulholland G.W., Butler K.M. Generation and Transport of Smoke Components. *Fire Technology*, 2004. Vol. 40. Pp. 149–176. DOI: 10.1023/B:FIRE.0000016841.07530.64.
4. Surikov A.V., Leshenyuk N.S. Opredelenie znacheniy parametrov modelirovaniya i interpretatsiya vyhodnykh dannykh v programmnom komplekse FDS pri raschete vidimosti v usloviyakh zadymleniya [Determination of simulation parameters values and output data interpretation in fds during calculating visibility in smoke conditions]. *Journal of Civil Protection*. 2018. Vol. 2, No. 3. Pp. 308–319. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.308.
5. Koshmarov Yu.A. *Prognozirovanie opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Forecasting of indoor fire hazards]: tutorial. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2000. 118 p. (rus)
6. Mulholland G. Smoke Production and Properties. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. By ed. P.J. DiNenno et al. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. Chapter 13. Pp. 2-291 – 2-302.
7. Surikov A.V., Leshenyuk N.S. Raschet vidimosti v pomeshcheniyakh v usloviyakh pozhara s primeneniem programmno go kompleksa FDS [Modeling of visibility in a room under fire conditions with

- application of the FDS software complex]. *Journal of Civil Protection*. 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 147-160. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.147.
8. Mulholland G.W. Specific extinction coefficient of flame generated smoke. *Fire and Materials*. 2000. Vol. 24, No. 5. Pp. 227–230. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-9.
9. Mulholland G.W. Johnsson E.L., Fernandez M.G., Shear D.A. Design and Testing of a New Smoke Concentration Meter. *Fire and Materials*. 2000. Vol. 24, No. 5. Pp. 231–243. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:53.0.CO;2-N.
10. Rabota v programmnom komplekse FireCat. Biblioteka reaktsiy i poverkhnostey goreniya v PyroSim [Work in the FireCat software package. Library of reactions and combustion surfaces in PyroSim], available at: https://www.pyrosim.ru/download/Firecat_FDS_fireload_lib.pdf (accessed: November 30, 2017). (rus)
11. Zotov Yu.S. *Protsess zadymleniya pomeshcheniy pri pozhare i razrabotka metoda rascheta neobkhodimogo vremeni evakuatsii lyudey* [The process of smoke pollution in the premises during a fire and the development of a method for the required time of evacuation of people]. PhD tech. sci. diss.: 05.26.01. Moscow, 1989. 273 p. (rus)
12. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnye sistemy smotryashego tipa* [Infrared systems of seeing type]: monograph. Moscow: Logos, 2004. 444 p. (rus)
13. Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Petukhov V.O. Kolichestvennyye kharakteristiki opticheskogo izlucheniya, prokhodyashchego cherez zadymlennuyu sredu [Quantitative characteristics of optical radiation passing through the environment]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2011. No. 2 (14). Pp. 14–18. (rus)
14. Trushkin D.V. *Sovershenstvovanie metodologii opredeleniya pozharной opasnosti stroitel'nykh materialov* [Improvement of the methodology for determining the fire hazard of building materials]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Moscow, 2004. 226 p. (rus)
15. Kochkin A.Yu. *Prognozirovanie i kontrol' ekologicheskoy opasnosti dymov* [Prediction and control of environmental hazard of fumes]: PhD tech. sci. diss.: 03.00.16. Bratsk, 2006. 160 p. (rus)
16. Dobbins R.A., Mulholland G.W., Bryner N.P. Comparison of fractal smoke optics model with light extinction measurement. *Atmospheric Environment*. 1994. Vol. 28, No. 5. Pp. 889–897. DOI: 10.1016/1352-2310(94)90247-X.
17. Tewarson A. Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fire. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. By ed. P.J. DiNenno et al. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008. Chapter 13. Pp. 3-109 – 3-195.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.20>

УДК 614.843-026.612

ГЕНЕРАТОР НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАКАЧКИ ДЛЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ ВИДЕНИЯ В ДЫМУ И РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ ЕЕ ДЕЙСТВИЯ

Суриков А.В., Лешенюк Н.С., Кулешов В.К.

Цель. Разработать генератор наносекундных импульсов для его применения в составе активно-импульсной системы видения в условиях пожара и провести анализ влияния уменьшения энергии импульса лазерной подсветки и спектральной чувствительности электронно-оптического преобразователя системы на дальность ее действия.

Методы. Значения амплитуды импульса, формируемого разработанным генератором, определялись экспериментально. Зависимости изменения дальности действия активно-импульсной системы видения от энергии импульса лазерного излучателя и спектральной чувствительности электронно-оптического преобразователя определялись расчетным методом.

Результаты. Разработан генератор наносекундных импульсов, позволяющий формировать импульсы тока амплитудой до 60 А, длительностью по уровню 0,5 $\tau \geq 2$ нс с фронтами 3–1,4 нс. Представлен аналитический метод расчета дальности действия активно-импульсной системы видения, позволяющий определять данный параметр с учетом длины волны зондирующего излучения и динамики пожара. Представлены результаты теоретического анализа дальности действия активно-импульсной системы видения при изменении энергии импульса подсветки лазерного прожектора и спектральной чувствительности электронно-оптического преобразователя системы.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть применены при разработке технических средств, предназначенных для формирования изображения объекта в условиях задымления.

Ключевые слова: активно-импульсная система видения, видимость, длительность импульса лазерного прожектора, показатель ослабления оптического излучения, длина волны зондирующего излучения.

(Поступила в редакцию 20 января 2021 г.)

Введение

Ограниченная видимость как один из факторов пожара оказывает влияние на скорость ориентирования в помещениях и проведения работ спасателями-пожарными по тушению пожаров, поиску и спасению людей.

Применяемые для целей улучшения видимости приборы (осветительные фонари, телевизионные системы, тепловизоры) не убирают помехи обратного рассеяния света и теплового излучения, что накладывает серьезные ограничения на возможности их применения. Для успешного решения данной проблемы перспективным является применение оптико-электронных систем, известных как активно-импульсные системы видения (АИСВ).

Принцип действия АИСВ основан на применении метода стробирования по дальности. Объект наблюдения освещается короткими лазерными импульсами длительностью $t_{имп}$, формируемыми лазерным прожектором. Отраженный от объекта наблюдения сигнал регистрируется оптическим прибором (приемной системой), состоящим из приемного объектива, оптического фильтра с максимумом полосы пропускания на длине волны лазерного излучения, электронно-оптического преобразователя (ЭОП). ЭОП выполняет функции усилителя яркости изображения и быстродействующего затвора, открывающегося на заданное короткое время $t_{ЭОП}$ в такт с излучением световых импульсов. Видеоизображение на мониторе образуется после передачи через согласующий элемент усиленного ЭОП оптического изображения на ПЗС-матрицу. В качестве согласующих элементов применяются линзовые согласующие объективы, фоконы или волоконно-оптические элементы [1; 2].

В том случае, когда временная задержка между моментом излучения импульса и моментом открывания затвора $t_{зат}$ равна удвоенному времени, необходимому для прохождения светом расстояния до объекта и обратно, наблюдатель будет видеть только сам объект и участок пространства (глубину просматриваемого пространства $\Delta l_{набл}$), непосредственно его

окружающий. В общем случае расстояние до наблюдаемого объекта $l_{об}$ определяется по формуле:

$$l_{об} = ct_{зад}/2, \quad (1)$$

где c – скорость света, м/с; $t_{зад}$ – временная задержка между моментом излучения импульса света лазерным прожектором и моментом открывания ЭОП, с.

АИСВ преимущественно применяются для улучшения видимости в тумане. Вместе с тем известно применение систем для получения изображений в воздушных, наземных, надводных и подводных условиях в зависимости от их назначения [3] на достаточно больших расстояниях (более 200 м). Количественная оценка улучшения видимости с применением АИСВ – отношение дальности действия системы $l_{действ}$ к предельной видимости человеком объекта наблюдения при задымлении $l_{пр}$ – проведена в работе [2]. Показано, что применение АИСВ позволяет получать изображения при задымлении на расстоянии в 3 раза большем, чем предельная видимость, т.е. без средств улучшения видимости.

Дальность действия АИСВ $l_{действ}$ – максимальное расстояние, на котором объект наблюдения может быть обнаружен и распознан, – зависит:

- от технических характеристик ЭОП (спектральная чувствительность, диаметр рабочего поля);
- технических характеристик ПЗС-матрицы (геометрические размеры, количество элементов);
- оптических характеристик излучающего блока и приемной системы (угол расходимости луча, пропускная способность оптических элементов);
- параметров лазерного прожектора (мощность излучения, длительность импульсов и их количество при формировании кадра);
- параметров рассеивающей среды и отражающей способности объекта наблюдения [4–6].

Для получения качественного изображения длительность импульсов $t_{имп}$ должна быть значительно (5–10 раз) меньше времени распространения света до объекта и обратно $t_{зад}$. Следовательно, уменьшение $t_{имп}$ является определяющим фактором для решения задачи по формированию изображений на малых расстояниях. Предварительная оценка значения $t_{имп}$ для АИСВ, применяемых в условиях задымления в помещениях, может быть проведена согласно формуле (1). Если принять размер помещений равным 3–5 м, то время задержки $t_{зад}$ будет равно 20–33 нс. Следовательно, исходя из условий качественного формирования изображения, длительность импульса лазерного прожектора $t_{имп}$ должна быть значительно меньше данного временного интервала и составлять 4–7 нс.

Характеристики коротких наносекундных импульсов излучения полупроводниковых лазеров определяются режимом накачки. Длительность и частота следования лазерных импульсов практически совпадают с формирующими импульсами тока накачки [7]. Поэтому при разработке лазерного прожектора АИСВ с короткими наносекундными импульсами основной задачей является разработка генератора коротких импульсов высокой мощности.

Уменьшение длительности импульсов лазерного излучения приводит к уменьшению энергии, попадающей на фотоприемник ЭОП и ПЗС-матрицу. Это приведет к изменению дальности действия системы $l_{действ}$, что необходимо учитывать при разработке АИСВ.

Дальность действия $l_{действ}$ также существенно зависит от параметров среды распространения лазерного излучения и технических характеристик элементов системы, в частности, спектральной чувствительности ЭОП.

В существующих методиках расчета АИСВ [4–6], применяемых для определения $l_{действ}$ в условиях тумана, не учитывается зависимость показателя ослабления k от длины волны λ зондирующего излучения. При этом k для тумана принимается постоянной величиной, определяемой согласно стандартному ряду Международного кода видимости [8]. Например, для густого тумана k равен $0,0196 \text{ м}^{-1}$. Этот подход ограничен условием, согласно которому при размере рассеивающих частиц более 1,2 мкм интенсивность рассеяния оптического излучения в ближнем ИК-диапазоне не зависит от λ . Максимум кривой распределения по размерам капель тумана обычно находится в диапазоне 5–15 мкм [4], что определяет корректность применения данного подхода.

Дым является очень сложной и динамичной системой. Очевидно, что его морфологические и оптические свойства отличаются от свойств тумана. Показатель ослабления k для дыма зависит от λ и времени горения пожарной нагрузки τ .

В данной работе приведены результаты исследований разработанного генератора наносекундных импульсов, обеспечивающего временные параметры АИСВ для их применения в помещениях в условиях пожара, а также представлены результаты оценки дальности действия системы с учетом уменьшения энергии сигнала, регистрируемого ее приемным блоком, и зависимости показателя ослабления k от длины волны λ зондирующего излучения.

Основная часть

Разработка и исследование генератора наносекундных импульсов. Источником питания лазерных прожекторов АИСВ служат специально разрабатываемые генераторы импульсов тока. Для применения АИСВ в условиях пожара такие генераторы должны обладать следующими характеристиками: частота следования импульсов ≈ 5 кГц, амплитуда 50–70 А, длительность 2–5 нс. Схемные решения такого типа генераторов описаны и проанализированы в монографии [9]. Разработанная нами схема представлена на рисунке 1.

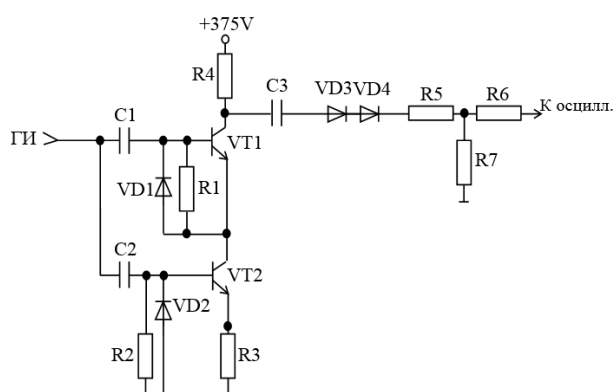


Рисунок 1. – Схема разработанного генератора наносекундных импульсов

Импульсы тока формируются схемой на основе каскодно включенных транзисторов VT1 и VT2, в качестве которых использованы транзисторы КТ630. Сопротивления $R1 = R2 = 2,4$ кОм, $R3 = 0,01$ Ом задают режим работы транзисторов КТ630, диоды VD1 и VD2, в качестве которых используются диоды КД503А, коммутируют паразитные сигналы на базах транзисторов и не допускают повышения силы тока базы выше предельных значений во время формирования выходных импульсов. Входные сигналы поступают на базы транзисторов через разделительные конденсаторы C1 и C2 емкостью 200 пФ. Конденсатор C3 служит накопителем энергии для формирования выходных импульсов. Сопротивление R4, равное 120 кОм, ограничивает силу тока в цепи заряда конденсатора C3. Последовательно с конденсатором C3 включены диоды VD3 и VD4, в качестве которых применены диоды 2Д212А. Величина собственной емкости каждого из этих диодов значительно изменяется при изменении величины и полярности приложенного напряжения, вследствие чего их последовательное включение с емкостью C3 приводит к уменьшению длительности фронтов выходных импульсов и амплитуды обратных импульсов. Сопротивление R5 установлено в схеме равным 3 Ом, что соответствует сопротивлению лазерного излучателя Л-13, включенного в прямом направлении и применяемого в АИСВ. Сопротивление R7 – измерительное сопротивление, равное 0,045 Ом, согласующее сопротивление R6 равно 51 Ом. На вход схемы от внешнего генератора, в качестве которого применялся генератор ГЗ-131, подавались запускающие импульсы со следующими параметрами: частота 5,2 кГц, длительность 0,1 мс, амплитуда 3 В. Измерение выходных сигналов осуществлялось на цифровом осциллографе DLO 5052a (полоса пропускания 500 МГц, время нарастания – 0,7 нс).

При поступлении запускающих импульсов на базы транзисторов VT1 и VT2 они открываются и в лавинном режиме протекания тока происходит разряд емкости C3. Таким образом в схеме формируются рабочие импульсы напряжения и соответствующего тока. Временные параметры импульсов определяются как величиной RC-цепочки, формирующей цепи (R5, VD3, VD4, C3, VT1 и VT2), так и скоростью нарастания лавины в обоих транзисторах VT1 и VT2. На рисунке 2 показана осциллограмма импульса, полученного при $C3 = 20$ пФ и напряжении питания $E_n = 375$ В. Представленный на рисунке 2 импульс имеет амплитуду тока около 58 А при длительности по уровню 0,5 – около 1,8 нс.

Как видно из рисунка 2, импульс имеет несколько отличающиеся по длительности участки нарастания 1 (длительность ≈ 3 нс) и спада 2 (длительность $\approx 1,4$ нс) тока и характерный обратный импульс после них 3 (амплитуда 27 А и длительность по уровню 0,5 $\approx 1,4$ нс). Минимизировать этот выброс можно, предельно сократив длину и, соответственно, реактивное сопротивление разрядной цепи. Полное устранение выброса, как правило, нецелесообразно, поскольку он будет способствовать рекомбинации избыточных зарядов в ла-

зерном диоде и уменьшению длительности заднего фронта светового импульса. Разная длительность переднего и заднего фронтов рабочих импульсов обусловлена главным образом различием скоростей отпираания и запираания формирующих диодов VD3, VD4.

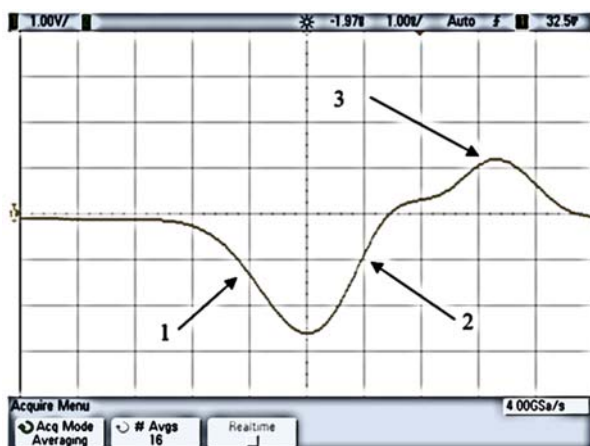


Рисунок 2. – Осциллограмма импульса напряжения, на сопротивлении 0,045 Ом, по вертикали 1 В/дел., по горизонтали 1 нс/дел.

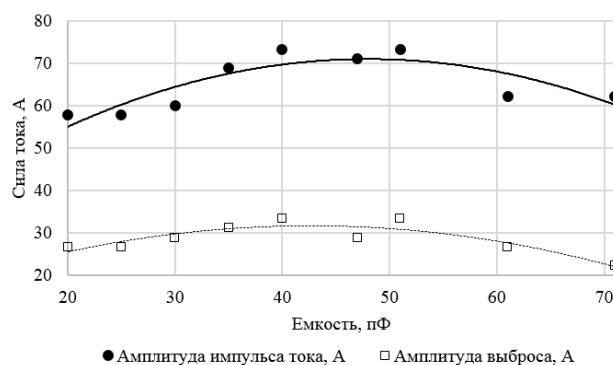


Рисунок 3. – Зависимость амплитуды тока импульса и выброса от накопительной емкости

Для определения влияния величины накопительной емкости С3 на токовые и временные характеристики импульсов была проведена серия измерений при варьировании данной емкости от 5 до 71 пФ. При значении емкости С3 в диапазоне 5–15 пФ схема не запускалась и выходной импульс отсутствовал. При повышении С3 выше 50 пФ происходило уменьшение амплитуды тока, обусловленное нелинейностью характеристик формирующих диодов VD3, VD4. Зависимость изменения амплитуды тока от накопительной емкости С3 приведена на рисунке 3.

Из приведенной зависимости видно, что наибольшая амплитуда тока импульсов соответствует диапазону накопительной емкости С3 от 35 до 50 пФ (около 70 А). Вместе с тем в указанном диапазоне наблюдается некоторое увеличение амплитуды выброса (участок 3 на рисунке 2), которая повысилась от 27 до 33 А. При варьировании С3 в исследуемом диапазоне длительность импульсов по уровню 0,5 и его фронтов практически не изменялась.

Для определения влияния подаваемого напряжения на перевод транзисторов VT1 и VT2 в лавинный режим проведена серия измерений для С3 = 20 пФ при варьировании E_n от 325 до 375 В. При уменьшении напряжения питания E_n ниже 325 В лавинный режим не возникал. При подаче напряжения E_n , превышающего 325 В, происходило плавное увеличение амплитуды импульса тока в лавинном режиме, а при превышении его значения выше 355 В – стабилизация амплитуды на значении около 60 А.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что оптимальными параметрами предложенной схемы генератора наносекундных импульсов являются: накопительная емкость С3 = 20–30 пФ, напряжение питания E_n = 355–375 В. При указанных параметрах предложенная схема позволяет формировать импульсы тока амплитудой до 60 А, длительностью по уровню 0,5 – 2 нс с фронтами 3–1,4 нс.

Для применения АИСВ в условиях пожара целесообразно предусмотреть увеличение длительности импульсов тока накачки лазерного прожектора примерно до 4 нс.

Увеличение длительности импульсов при использовании представленной схемы затруднительно, т.к. постоянная времени разрядной цепи транзисторов КТ630 составляет менее 0,1 нс. Переход на более «медленные» транзисторы или переход от каскодной схемы к параллельному включению транзисторов КТ630 несущественно увеличит длительность импульсов, увеличив длительность фронтов. Увеличение длительности выходного сигнала в рамках исследованного схемотехнического подхода было получено при изменении номинала емкости С3 с дополнительным включением параллельно диодам VD3 и VD4 емкости 200 пФ и последовательно им катушки индуктивности ($L1 = 8$ мкГн) с параллельно включенным резистором 0,39 Ом. Таким образом измененная разрядная цепь позволила увеличить длительность выходного импульса тока до 3 нс.

Дополнительно был исследован двухкаскадный формирователь тока, состоящий из двух последовательно включенных схем, аналогичных представленной на рисунке 2, с той

лишь разницей, что в первой из них последовательно R3 установлена катушка индуктивности ($L2 = 1,3 \text{ мкГн}$), а разрядная выходная цепь второй изменена как указано выше. В результате длительность импульса тока удалось увеличить еще на 0,5 нс.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что на базе отечественных компонентов можно реализовать достаточно простую, малогабаритную схему накачки лазерного прожектора для АИСВ с параметрами: амплитуда тока 50–60 А, длительность импульса 2–3,5 нс и более, длительности фронтов 3–1,4 нс.

Определение дальности действия АИСВ с учетом уменьшения энергии зондирующего импульса. Длительность импульсов лазерного излучателя $t_{имп}$ в существующих АИСВ, как правило, составляет примерно 100 нс. Эффективное применение АИСВ в условиях пожара требует использования импульсов излучения значительно меньшей длительности. Потому целесообразно оценить влияние уменьшения $t_{имп}$ на дальность действия $l_{действ}$ АИСВ. Вопросу оценки дальности действия АИСВ посвящен ряд работ [4–6]. Исходя из уравнения энергетического баланса излучения, дальность действия АИСВ $l_{действ}$ определяется из выражения:

$$l_{действ} = \frac{k_{проп} n_1}{\gamma_n M_{co}} F_{ex} \sqrt{\frac{\alpha k_{ном\Sigma} n t_{имп} S_{\lambda} \Phi_{подсв} A_{ПЗС}}{\pi N_l N_h q_e N_{пор}}} \cos \beta, \quad (2)$$

где $k_{проп}$ – коэффициент пропускания среды распространения оптического излучения; n_1 – число суммируемых элементов по одной координате; γ_n – угол обзора системы, рад; M_{co} – модуль коэффициента линейного увеличения согласующей оптики, определяемый отношением диагонали активной фоточувствительной поверхности ПЗС-матрицы к диаметру рабочего поля изображения ЭОП; F_{ex} – относительное отверстие объектива на входе фотоприемника, определяемое отношением диаметра входного объектива фотоприемника к его фокусному расстоянию; α – коэффициент отражения поверхности объекта наблюдения; $k_{ном\Sigma}$ – суммарный коэффициент пропускания излучения оптической части блоков лазерного прожектора и приемной системой АИСВ, равный произведению коэффициента пропускания излучения оптической системой прожектора и коэффициентов пропускания излучения входным объективом фотоприемника и оптическим фильтром (при его наличии); n – количество лазерных импульсов за время формирования одного кадра; $t_{имп}$ – длительность лазерного импульса, с; S_{λ} – спектральная чувствительность фотокатода ЭОП на длине волны λ лазерного излучателя, А/Вт; $\Phi_{подсв}$ – поток излучения лазерного прожектора (пиковая мощность), Вт; $A_{ПЗС}$ – площадь фоточувствительной поверхности ПЗС-матрицы, м²; N_l, N_h – число элементов ПЗС-матрицы по горизонтали и вертикали соответственно; $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд одного электрона; $N_{пор}$ – пороговое значение числа фотоэлектронов, вылетающих с площадки фотокатода ЭОП, соответствующей одному элементу изображения, которое регистрируется фотоприемником на предельной дальности $l_{действ}$. Определяется произведением порогового отношения сигнал/шум на число шумовых электронов на элементе изображения, приведенное к фотокатоду ЭОП; β – угол между направлением луча и нормалью к облучаемой поверхности, рад [4; 6].

Коэффициент пропускания среды $k_{проп}$ определяется по формуле:

$$k_{проп} = e^{-k l_{действ} k_{en}}, \quad k_{en} = \left(1 + e^{-\frac{\gamma_n}{2\mu}} \right) \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma_n}{4} + e^{-\frac{\gamma_n}{2\mu}}, \quad (3)$$

где k_{en} – коэффициент уменьшения показателя ослабления за счет рассеяния проходящего излучения «вперед», который принимает значения от 0 до 1; μ – параметр, характеризующий вытянутость индикатрисы рассеяния; k – показатель ослабления излучения вследствие рассеяния.

Показатель ослабления k зависит от длины волны зондирующего излучения λ , от времени горения τ и типа пожарной нагрузки и определяется по формуле:

$$k_{\lambda}(\tau) = \frac{BD_{\lambda}Z}{V} \left(1 - e^{-A\tau^n/B} \right), \quad (4)$$

где B – размерный параметр, зависящий от теплоты сгорания горючего материала и свободного объема помещения, кг; D_{λ} – дымообразующая способность горящего материала, опре-

деляемая для заданной длины волны зондирующего излучения, $\text{Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$; Z – параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте; V – свободный объем помещения, м^3 ; A – размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала и площадь пожара, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-n}$; n – показатель степени, который зависит от характера распространения пламени. Параметры A , B , Z и n определяются по стандартной методике ГОСТ¹.

Для оценки корректности применения формулы (2) был проведен расчет дальности действия экспериментального образца АИСВ, описанного в работе [2], для прозрачной среды, т.е. при $k_{\text{прон}} = 1$. В результате расчета дальность действия $l_{\text{действ}}$ составила 313 м, что соответствует заявленным характеристикам системы (дальность наблюдения до 300 м [10]).

Далее были проведены расчеты дальности действия АИСВ при уменьшении длительности и, соответственно, энергии зондирующего импульса. Поскольку провести расчет абсолютных значений $l_{\text{действ}}$ достаточно сложно, данную оценку проводили на примере исследованного в работе [2] образца АИСВ с длительностью импульсов подсветки 120 нс. Указанный образец имел следующие технические характеристики: длина волны излучателя ~840 нм; частота следования импульсов – 520 Гц; амплитуда тока накачки 20–45 А; пиковая мощность импульса лазерного излучения 320 Вт; количество лазерных импульсов за время формирования одного кадра – 93; коэффициент пропускания оптической системы прожектора – 0,9; диаметр входного объектива – 48 мм, его фокусное расстояние – 135 мм; спектральная чувствительность фотокатода ЭОП на длине волны λ (850 нм) лазерного излучателя – 170 мА/Вт; диаметр рабочего поля изображения – 18 мм; коэффициент пропускания входного объектива фотоприемника – 0,9; коэффициент пропускания оптического фильтра входного объектива фотоприемника – 0,82; размер и диагональ ПЗС-матрицы – 4,8×3,6 мм и 1/3" (6 мм); число эффективных пикселей – 500×582; угол подсветки – 5°.

На рисунке 4 показаны результаты расчетов $l_{\text{действ}}$ на основании формулы (2) в зависимости от показателя ослабления рассеивающей среды k , выполненных для значений длительностей импульса лазерной подсветки $t_{\text{имп}}$, равной 120, 7 и 4 нс, т.е. при уменьшении энергии импульса подсветки в 17 и 30 раз. Остальные расчетные параметры $l_{\text{действ}}$ приняты одинаковыми для всех трех значений длительности импульсов излучения.

Результаты расчетов показывают, что отношение $l_{\text{действ}}$ при $t_{\text{имп}} = 120$ нс к $l_{\text{действ}}$ при $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс уменьшается с уменьшением прозрачности среды распространения лазерного излучения. Графически данная зависимость представлена на рисунке 5.

Так, для прозрачной среды ($k = 0$, на рисунке 5 не показано) $l_{\text{действ}}$ при $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс по сравнению $l_{\text{действ}}$ при $t_{\text{имп}} = 120$ нс уменьшается в 4–5,5 раза. При уменьшении прозрачности среды, т.е. при увеличении k , данное отношение уменьшается.

В частности, при малых значениях k ($< 0,3 \text{ м}^{-1}$) для системы с $t_{\text{имп}} = 120$ нс дальность действия $l_{\text{действ}}$ превышает $l_{\text{действ}}$ системы с $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс на 30–50 %. При повышении k до значений 1,5–3 м^{-1} дальность действия для АИСВ с $t_{\text{имп}} = 4$ –7 нс ниже всего на 10–20 %. Исходя из уравнения (23) ГОСТ² ($l_{\text{пр}} = 2,38 / k$), значения $k = 1,5$ –3,0 м^{-1} соответствуют расстоянию предельной видимости $l_{\text{пр}}$, равному 1–2 м, т.е. очень сильному задымлению.

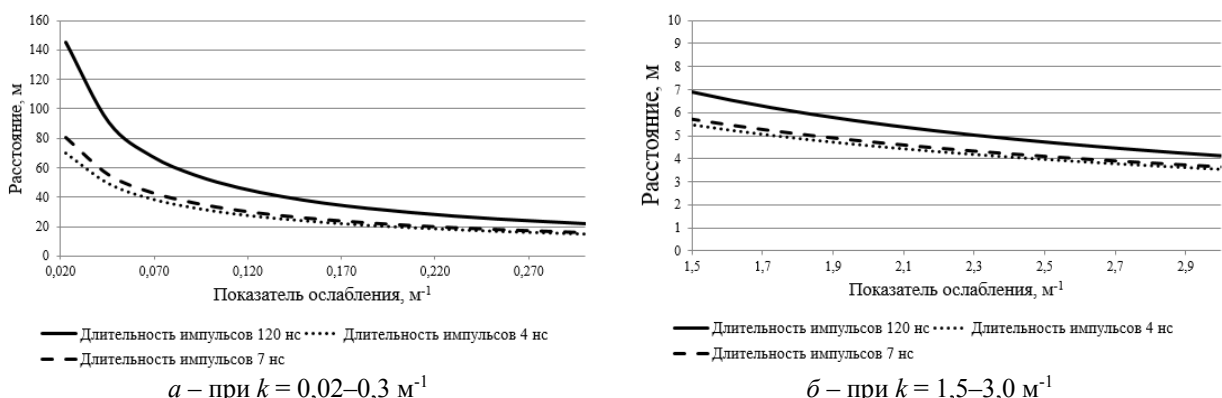


Рисунок 4. – Зависимости дальности действия АИСВ от показателя ослабления при длительности импульсов подсветки 120, 7 и 4 нс

¹ Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Взамен ГОСТ 12.1.004-85; введ. 17.12.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 88 с.

² См. сноску 1.

Следовательно, при увеличении прозрачности атмосферы влияние энергии импульса подсветки на дальность действия АИСВ увеличивается. Напротив, при увеличении плотности задымления влияние увеличения энергии импульса подсветки (например, за счет увеличения длительности лазерных импульсов) на $l_{\text{действие}}$ значительно замедляется. Другими словами, улучшение видимости с АИСВ с большим значением $t_{\text{имп}}$ будет выше при меньших плотностях дыма. Однако при определенных значениях показателя ослабления среды это увеличение практически нивелируется. Так, при значениях показателя ослабления k 1,5–3,0 м⁻¹ (т.е. при расстоянии предельной видимости $l_{\text{пр}}$, равном 1–2 м) уменьшение дальности действия АИСВ $l_{\text{действие}}$ за счет уменьшения длительности импульса подсветки в 30 раз составит около 10–20 % (рис. 5).

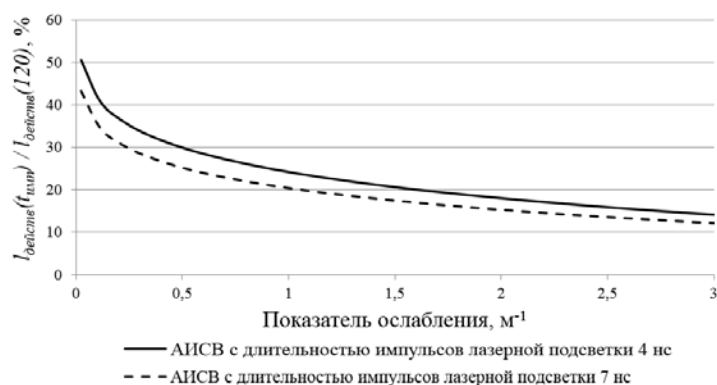


Рисунок 5. – Зависимость изменения дальности действия АИСВ от показателя ослабления при уменьшении длительности импульсов лазерного прожектора

Определение дальности действия АИСВ с учетом длины волны зондирующего излучения. Как следует из формулы (2), дальность действия АИСВ $l_{\text{действие}}$ зависит от спектральной чувствительности фотокатода S_{λ} ЭОП и коэффициента пропускания $k_{\text{проп}}$ на длине волны λ лазерного излучателя. Спектральная чувствительность фотокатода определяется прежде всего поколением разработки ЭОП. На сегодня серийно производятся ЭОП поколения III и III+ с фотокатодами на основе GaAs и проводится разработка перспективных образцов поколений IV и V.

Максимум спектральной чувствительности фотокатодов ЭОП поколения III и III+ находится в диапазоне 400–900 нм. На длине волны 850 нм она составляет 150–190 мА/Вт. Известны ЭОП с фотокатодами на основе InGaAs, имеющие смещенную спектральную чувствительность в область ближнего ИК-диапазона до 1100 нм. Такие ЭОП имеют спектральную чувствительность S_{λ} на длине волны 1060 нм, равную 0,025–0,35 мА/Вт. На данной длине волны стандартные ЭОП поколения III и III+ имеют S_{λ} , равную 0,7 мА/Вт [11].

К наиболее перспективным разработкам ЭОП как элемента АИСВ следует отнести фотоприемные модули с фотокатодами с барьером Шоттки со спектральной областью чувствительности до 1700 мкм. Данные модули имеют спектральную чувствительность S_{λ} на длине волны 1540 нм, равную 44 мА/Вт [12]. Это дает возможность применения лазерных прожекторов с длиной волны более 850 нм. Такие прожекторы, безусловно, будут способствовать более эффективному ослаблению помехи обратного рассеяния.

Проведем теоретическую оценку изменения дальности действия АИСВ $l_{\text{действие}}$ в зависимости от длины волны зондирующего излучения. С учетом предварительно полученных экспериментальных зависимостей ослабления оптического излучения при его прохождении через дым от длины волны было определено отношение показателя ослабления на длине волны 1100 нм k_{1100} и на длине волны 1700 нм k_{1700} к показателю ослабления на длине волны 850 нм k_{850} . Эти отношения составили: $k_{1100}/k_{850} = 0,78$, $k_{1700}/k_{850} = 0,51$.

Тогда при увеличении λ с 850 нм до 1100 нм на основании формулы (2) значение дальности системы $l_{\text{действие}}$ увеличивается в 1,2 раза, а при увеличении λ с 850 нм до 1700 нм – в 1,5 раза.

Однако полученные значения определены при условии неизменности параметров системы, что не всегда справедливо. Во-первых, для рассматриваемого нами целевого применения АИСВ энергия импульса будет уменьшаться вследствие уменьшения длительности

Полученные результаты подтверждаются результатами работы [6] относительно расчетной оценки влияния энергии импульса на дальность АИСВ, проведенной для условий тумана.

Это позволяет сделать вывод, что уменьшение длительности импульсов подсветки до значения 4–7 нс при одновременном уменьшении расстояния до объекта наблюдения до 3–5 м не оказывают значительного влияния на дальность действия АИСВ при уменьшении энергии импульса подсветки до 30 раз.

импульсов подсветки $t_{\text{имп}}$. Во-вторых, S_λ при увеличении λ как было отмечено, заметно снижается. Например, в современных фотоприемных модулях с фотокатодом с барьером Шоттки S_λ приблизительно в 5 раз меньше, чем в стандартных ЭОП с фотокатодами на основе GaAs при $\lambda = 850$ нм. В ЭОП с применением фотокатода на основе InGaAs S_λ при $\lambda = 1060$ нм в 2 раза меньше, чем у стандартных ЭОП поколения III и III+ при данной λ .

На рисунке 6 показана зависимость отношения дальности действия АИСВ при длине волны 1700 и 1100 нм $l_{\text{действие}}(\lambda)$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм $l_{\text{действие}}(850)$ от относительного уменьшения энергии импульса излучения.

Анализ зависимости показывает, что при уменьшении энергии импульса до 100 раз $l_{\text{действие}}(1700)$ больше $l_{\text{действие}}(850)$ в 1,2–1,5 раза. При $\lambda = 1100$ нм данное отношение составляет 1,1–1,2 раза, т.е. при уменьшении энергии импульса системы несколько уменьшается и эффективность применения лазерной подсветки с длиной волны большей по сравнению со стандартным значением.

В связи с возможностью практической реализации источников зондирующего излучения с длинами волн $\lambda = 1060$ нм и $\lambda = 1540$ нм определены соответствующие отношения значений показателя ослабления к его значению на длине волны 850 нм: $k_{1060} / k_{850} = 0,81$, $k_{1540} / k_{850} = 0,56$.

Для определения эффективности применения АИСВ со смещенной спектральной чувствительностью ЭОП S_λ до 1060 нм была проведена серия расчетов дальности действия АИСВ $l_{\text{действие}}(1060)$ в сравнении с $l_{\text{действие}}(850)$. Теоретическая оценка показывает, что для достижения увеличения дальности в 1,1–1,2 раза при уменьшении энергии импульсов излучения до 100 раз необходимо повышение спектральной чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg в 4–8 раз по сравнению со спектральной чувствительностью ЭОП с фотокатодами на основе GaAg. Однако, как отмечено в работе [13], на сегодня значения чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg близки к теоретически предельным. Это позволяет сделать вывод, что применение лазерных прожекторов на длине волны 1060 нм не является целесообразным.

Для определения эффективности применения ЭОП с максимальной спектральной чувствительностью S_λ на длине волны 1540 нм была проведена серия расчетов дальности действия АИСВ согласно формуле (2). Эффективность определялась как отношение дальности действия АИСВ на длине волны $\lambda = 1540$ нм $l_{\text{действие}}(1540)$ к дальности действия АИСВ на длине волны $\lambda = 850$ нм $l_{\text{действие}}(850)$. При этом на основании данных [11; 12] значение S_λ для АИСВ с $\lambda = 1540$ нм принималось в 5 раз меньшим по сравнению с АИСВ с $\lambda = 850$ нм. Для учета влияния уменьшения длительности импульса подсветки $t_{\text{имп}}$ энергия импульса уменьшалась до 100 раз. Оценка эффективности определялась с учетом степени задымления помещений, т.е. для разных значений показателя ослабления среды k .

Результаты расчетов приведены на рисунке 7.

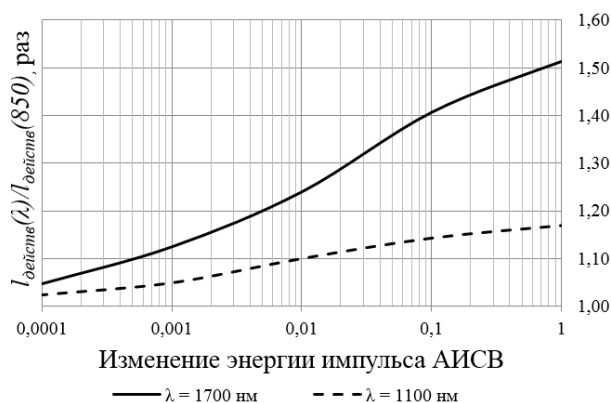


Рисунок 6. – Отношение дальности действия АИСВ при длине волны 1700 и 1100 нм $l_{\text{действие}}(\lambda)$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм $l_{\text{действие}}(850)$

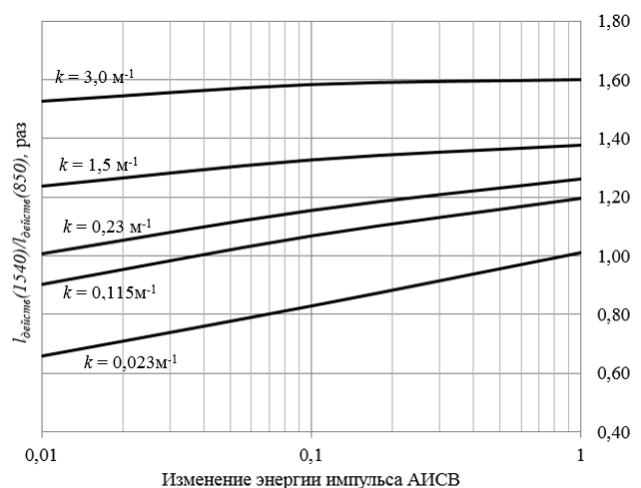


Рисунок 7. – Зависимость отношения дальности действия АИСВ при длине волны 1540 нм $l_{\text{действие}}(1540)$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм $l_{\text{действие}}(850)$ от изменения энергии импульса системы

Из графиков рисунка 7 видно, что при достаточно малых значениях показателя ослабления k ($k = 0,023 \text{ м}^{-1}$) и уменьшении энергии импульса излучения до 100 раз дальность действия АИСВ при $\lambda = 1540 \text{ нм}$ составляет 0,7–1 от дальности действия АИСВ при $\lambda = 850 \text{ нм}$.

При повышении плотности задымления (увеличении k до значений $0,23 \text{ м}^{-1}$, т.е. при предельной видимости $l_{пр}$ около 10 м) это отношение увеличивается до 1–1,3.

При дальнейшем увеличении показателя ослабления k (до значений $1,5\text{--}3 \text{ м}^{-1}$, т.е. при предельной видимости $l_{пр}$ около 1–2 м) дальность действия АИСВ при $\lambda = 1540 \text{ нм}$ превышает дальность действия АИСВ при $\lambda = 850 \text{ нм}$ в 1,2–1,6 раз во всем исследуемом диапазоне энергии импульса подсветки системы. Это отношение приближается к максимальному значению указанного диапазона при увеличении плотности задымления.

Анализ проведенных расчетов показывает, что при малых значениях плотности задымления основной вклад в значение дальности действия АИСВ $l_{действ}$ при уменьшении энергии импульса системы и увеличении длины волны зондирующего излучения λ от 850 нм до 1540 нм вносит спектральная чувствительность ЭОП. При увеличении плотности задымления это влияние уменьшается и $l_{действ}$ определяется значением коэффициента пропускания среды $k_{проп}$, который увеличивается при увеличении λ . Таким образом, повышение дальности действия АИСВ $l_{действ}$ для помещений размером 3–5 м при применении ЭОП с максимальной чувствительностью на длине волны $\lambda = 1540 \text{ нм}$ по сравнению с АИСВ с применением стандартных ЭОП ($\lambda = 850 \text{ нм}$) составляет 1,2–1,6 раза. Это определяет перспективность применения лазерных прожекторов на длине волны 1540 нм.

Заключение

1. Предложена схема генератора наносекундных импульсов, позволяющая формировать импульсы тока амплитудой до 60 А, длительностью $\geq 2 \text{ нс}$ по уровню 0,5, с фронтами 3–1,4 нс. Данная схема генератора импульсов может быть реализована в АИСВ, предназначенных для использования в помещениях с размерами 3–5 м.

2. Показано, что уменьшение длительности импульсов излучения АИСВ до 4–7 нс при расстояниях до наблюдаемого объекта 3–5 м не оказывает значительного влияния на дальность действия АИСВ. При значении показателя ослабления оптического излучения, равном $1,5\text{--}3,0 \text{ м}^{-1}$, и уменьшении энергии импульса подсветки до 30 раз дальность действия системы уменьшается на 10–20 %.

3. Определено, что при неизменной энергии импульса излучения и спектральной чувствительности ЭОП S_λ дальность системы $l_{действ}$ увеличивается в 1,2 раза при увеличении длины волны зондирующего излучения λ с 850 нм до 1100 нм и в 1,5 раза при увеличении λ с 850 нм до 1700 нм.

При уменьшении энергии импульса излучения до 100 раз отношение дальности действия АИСВ при $\lambda = 1700 \text{ нм}$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм увеличивается в 1,2–1,5 раза, а при $\lambda = 1100 \text{ нм}$ – в 1,1–1,2 раза.

Установлено, что для эффективного применения АИСВ на длине волны лазерного прожектора 1060 нм необходимо повышение спектральной чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg на данной длине волны в 4–8 раз по сравнению со спектральной чувствительностью стандартных ЭОП с фотокатодами на основе GaAg. С учетом того что в настоящее время значения чувствительности ЭОП с фотокатодами на основе InGaAg близки к теоретически предельным, применение лазерных прожекторов на длине волны 1060 нм не является целесообразным.

Перспективным для применения АИСВ в условиях задымления при пожаре является использование лазерных излучателей с длиной волны 1540 нм. При малых значениях плотности задымления (показатель ослабления $k < 0,23 \text{ м}^{-1}$) и уменьшении энергии импульса подсветки системы до 100 раз отношение дальности действия АИСВ при $\lambda = 1540 \text{ нм}$ к дальности действия АИСВ при длине волны 850 нм составляет 1–1,3 раза. При увеличении показателя ослабления до значений $1,5\text{--}3,0 \text{ м}^{-1}$ это отношение составляет 1,2–1,6 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суриков, А.В. Основные методы и устройства, применяемые и перспективные для улучшения видимости при чрезвычайных ситуациях / А.В. Суриков, В.О. Петухов, В.В. Горобец // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2011. – № 1(29). – С. 121–129.

2. Оптико-электронная система улучшения видимости при задымлении / А.В. Суриков [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2 (20). – С. 4–12.
3. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях / В.В. Капустин [и др.] // Транспортные системы и технологии. – 2018. – № 4 (1). – С. 68–83. DOI: 10.17816/transsyst2018041068-083.
4. Дегтярев, П.А. Исследование и разработка устройств получения видеосигнала в активно-импульсной телевизионной системе наблюдения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / П.А. Дегтярев. – Томск, 2005. – 160 л.
5. Волков, В.Г. Основы построения активно-импульсных приборов ночного видения с использованием лазерных излучателей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.27.03 / В.Г. Волков. – М., 2005. – 367 л.
6. Кирпиченко, Ю.Р. Оценка возможностей регистрации изображений активно-импульсной телевизионной системой в сложных условиях наблюдения // Ю.Р. Кирпиченко // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 1. – С. 114–117.
7. Капустин, В.В. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы с повышенной устойчивостью к оптическим помехам: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / В.В. Капустин. – Томск, 2017. – 118 л.
8. Тарасов, В.В. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход: учебник / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков; под ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Университетская книга, 2016. – 488 с.
9. Дьяконов, В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс. – 2009. – 420 с.
10. Активно-импульсные системы видения и алгоритмы определения расстояний до объектов / В.А. Горобец [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81, № 2. – С. 283–291.
11. Бухаров, П.В. Фотокатоды современных ЭОП / П.В. Бухаров // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 1. – С. 106–109.
12. Фотоприемный модуль с фотокатодом с барьером Шоттки на основе структуры InP/InGaAs/InP:Ag и с чувствительностью до 1,7 мкм / Ю.К. Грузевич [и др.] // Прикладная физика. – 2015. – № 4. – С. 76–81.
13. Гибин, И.С. Электронно-оптический преобразователь изображения с автоэмиссионным фотокатодом / И.С. Гибин, П.Е. Котляр // Прикладная физика. – 2019. – № 3. – С. 31–38.

**Генератор наносекундных импульсов накачки для активно-импульсной системы
видения в дыму и расчет дальности ее действия**

**Generator of nanosecond pulses of pumping for an active pulse vision system in smoke
and calculation of the its action range**

Суриков Андрей Валерьевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра организации
службы, надзора и правового обеспечения

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

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Andrey V. Surikov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Organization of Service, Supervision
and Law Support, Head of the Chair

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

e-mail: shurikoff@bk.ru

ORCID: 0000-0002-3659-7297

Лешенюк Николай Степанович

доктор физико-математических наук,
профессор

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

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

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

Nikolay S. Leshenyuk

Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

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

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

e-mail: nleshenyuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-9086

Кулешов Владимир Константинович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра естественных
наук, заведующий лабораторией

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

e-mail: voldemar.kul@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2478-3380

Vladimir V. Kuleshov

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Natural Sciences, Head of Laboratory

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

e-mail: voldemar.kul@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2478-3380

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.20>**GENERATOR OF NANOSECOND PULSES OF PUMPING FOR AN ACTIVE PULSE VISION SYSTEM IN SMOKE AND CALCULATION OF THE ITS ACTION RANGE****Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Kuleshov V.V.**

Purpose. To develop a generator of nanosecond pulses for its use as part of an active pulse vision system under fire conditions and to analyze the effect of a decrease in the laser illumination pulse energy and the spectral sensitivity of the image converter system on the range of its action.

Methods. The amplitude of the pulse generated by the developed generator was determined experimentally. The dependences of the change in the range of the active pulse vision system on the pulse energy of the laser emitter and the spectral sensitivity of the image-converter were determined by the calculation method.

Findings. A generator of nanosecond pulses has been developed, which makes it possible to generate current pulses with an amplitude of up to 60 A, a duration at a level of $0.5 \tau \geq 2$ ns, with edges of 3–1.4 ns. An analytical method for calculating the range of an active pulse vision system is presented, which makes it possible to determine this parameter taking into account the wavelength of the probing radiation and the dynamics of the fire. The results of a theoretical analysis of the range of an active pulse vision system when changing the energy of the laser illumination pulse and the spectral sensitivity of the image converter system are presented.

Application field of research. The results of the study can be applied in the development of technical means designed to form an image of an object in smoke conditions.

Keywords: active pulse vision system, visibility, pulse duration of a laser searchlight, attenuation index of optical radiation, wavelength of probing radiation.

(The date of submitting: January 20, 2021)

REFERENCES

1. Surikov A.V., Petukhov V.O., Gorobets V.V. Osnovnye metody i ustroystva, primenyaemye dlya uluchsheniya vidimosti pri chrezvichaynykh situatsiyah [Current and prospective basic methods and devices to improve visibility in emergency situations]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. 2011. No. 1(29). Pp. 121–129. (rus)
2. Surikov A.V., Leshenyuk N.S., Kunceвич B.F., Gorobets V.V. Optiko-elektronnaya sistema uluchsheniya vidimosti pri zadymlenii [Optoelectronic system to increase visibility in a smoky environment]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 2 (20), Pp. 4–12. (rus)
3. Kapustin V.V., Movchan A.K., Zaytseva E.V., Kuryachiy M.I. Aktivno-impul'snye televizionnye izmeritel'nye sistemy dlya obespecheniya navigatsii transportnykh sredstv v slozhnykh meteousloviyakh [Active pulse television measuring systems for ensuring navigation of transport means in heavy weather conditions]. *Transportation Systems and Technology*, 2018. No. 4 (1), Pp. 68–83. (rus). DOI: 10.17816/transsystr2018041068-083.
4. Degtyarev P.A. Issledovanie i razrabotka ustroystv polucheniya videosignala v aktivno-impul'snoy televizionnoy sisteme nablyudeniya [Research and development of video signal acquisition devices in an active-pulse television surveillance system]: PhD tech. sci. diss.: 05.12.04. Tomsk, 2005. 160 p. (rus)
5. Volkov V.G. Osnovy postroeniya aktivno-impul'snykh priborov nochnogo videniya s ispol'zovaniem lazernykh izluchateley [Fundamentals of construction active-pulse night vision devices using laser emitters]: Grand PhD tech. sci. diss.: 05.27.03. Moscow, 2005. 367 p. (rus)
6. Kirpichenko Yu.R. Otsenka vozmozhnostey registratsii izobrazheniy aktivno-impul'snoy televizionnoy sistemoy v slozhnykh usloviyakh nablyudeniya [Evaluation of capabilities to register images made by gated viewing laser camera system in severe observation conditions]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011. No. 2 (24), Pp. 114–117. (rus)
7. Kapustin V.V. Aktivno-impul'snye televizionnye izmeritel'nye sistemy s povyshennoy ustoychivost'yu k opticheskim pomekham [Active-pulse television measuring systems with increased resistance to optical interference]: PhD tech. sci. diss.: 05.12.04. Tomsk, 2017. 118 p. (rus)

8. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. *Vvedenie v proektirovanie optiko-elektronnykh priborov: sistemnyy podkhod* [Introduction to the design of optoelectronic devices: a systematic approach]: textbook. Moscow: Universitetskaya kniga, 2016. 488 p. (rus)
9. D'yakonov V.P. *Generatsiya i generatory signalov* [Signal generation and generators]. Moscow: DMK Press, 2009. 420 p. (rus)
10. Gorobetz V.A., Kabanov V.V., Kabashnikov V.P., Kuntsevich B.F., Metelskaya N.S., Shabrov D.V. Active pulse vision systems and algorithms for determining distances to objects. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2014. Vol. 81, No. 2. Pp. 279–287. DOI: 10.1007/s10812-014-9922-9.
11. Buharov P.V. Fotokatody sovremennykh EOP [Photocathodes of modern image intensifier]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011. No. 2 (24). Pp. 106–109. (rus)
12. Gruzevich Yu.K., Gordienko Yu.N., Balyasnyy L.M., Al'kov P.S., Ivanov V.Yu., Dyatlov A.L., Vatsenko P.I. Fotopriemnyy modul' s fotokatodom s bar'erom Shottki na osnove struktury InP/InGaAs/InP:Ag i s chuvstvitel'nost'yu do 1,7 mkm [Photodetector photocathode with a Schottky barrier based on the InP/InGaAs/InP: Ag structure sensitive up to 1.7 μ m]. *Prikladnaya fizika*, 2015. No. 4. Pp. 76–81. (rus)
13. Gibin I.S., Kotlyar P.E. Elektronno-opticheskiy preobrazovatel' izobrazheniya s avtoemissionnym fotokatodom [Electron-optical converter with autoemission photocathode]. *Prikladnaya fizika*, 2019. No. 3. Pp. 31–38. (rus)

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.33>

УДК 614.841.332:624.94.012.45

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО МОНОЛИТНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ В СОСТАВЕ ФРАГМЕНТА КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОГНЕСТОЙКОСТИ В РАМКАХ НАТУРНЫХ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Кудряшов В.А., Жамойдик С.М., Кураченко И.Ю., Мордич М.М.

Цель. На основе результатов сопоставительного численного конечно-элементного моделирования разработать и возвести конструкцию железобетонного монолитного перекрытия с теоретическим пределом огнестойкости REI 150 в составе экспериментального фрагмента каркасного здания, включающего сборные центрифугированные колонны, для исследования огнестойкости в рамках натурных огневых испытаний, приближенных к стандартному температурному режиму пожара.

Методы. Анализ результатов существующих исследований и методов для достижения цели исследований. Численное конечно-элементное моделирование железобетонных конструкций с использованием ПК ЛИРА-САПР 2013 R5. Метод аналогии. Оценка огнестойкости методом предельного равновесия. Измерения толщины защитного слоя бетона магнитным методом. Измерения геометрии методом лазерного нивелирования.

Результаты. Монолитные железобетонные каркасные системы зданий в настоящее время являются наиболее распространенными при строительстве многоэтажных зданий, такие системы обладают высокой потенциальной огнестойкостью, при этом экспериментальные исследования ввиду сложности воссоздания реальных условий сопряжения и нагружения, практически не проводились. Для решения указанной проблемы выполнено численное конечно-элементное моделирование плоского железобетонного монолитного перекрытия толщиной 200 мм в составе 2-этажного каркасного здания с сеткой колонн 6×6 м и расчетной полезной нагрузкой 10 кН/м². Рассчитано требуемое армирование железобетонного монолитного перекрытия исходя из усилий и конструктивных требований, в том числе расчетных сочетаний нагрузок и усилий. Фрагмент железобетонного перекрытия размером 3×9 м из центральной части 1-го этажа каркаса перенесен методом аналогии в экспериментальный фрагмент, включающий в качестве опор две железобетонные центрифугированные колонны с пролетом 6,0 м и увязан с ними. Предел огнестойкости перекрытия, определенный методом предельного равновесия с учетом потенциала перераспределения усилий, составил не менее REI 150. На основании проведенного конструирования возведен фрагмент каркасного здания для исследования огнестойкости в рамках натурных огневых испытаний, приближенных к стандартному температурному режиму пожара.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть применены для проведения натурных огневых испытаний возведенного фрагмента, проектирования и конструирования аналогичных железобетонных монолитных, сборно-монолитных перекрытий, при разработке методик оценки огнестойкости железобетонных конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, натурные огневые испытания, железобетонное монолитное перекрытие, каркасное здание, моделирование, расчетная модель, конструирование, ЛИРА-САПР, возведение, строительство.

(Поступила в редакцию 27 января 2021 г.)

Введение

Применение современных технологий проектирования и строительства зданий является перспективным для любой экономически развитой страны, включая Республику Беларусь¹. В настоящее время в массовом строительстве Беларуси широко применяются сборные, монолитные и сборно-монолитные железобетонные конструкции. Каркасы таких зданий могут включать сборные и монолитные элементы перекрытий и колонн в различных сочетаниях. При этом образуются многопролетные многоэтажные рамы, способные воспринимать

¹ О приоритетных направлениях развития строительной отрасли [Электронный ресурс]: директива Президента Республики Беларусь, 4 марта 2019 г., № 8. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=3871&p0=P01900008>. – Дата доступа: 20.01.2021.

комплекс горизонтальных нагрузок и изгибающих моментов (воздействий), в том числе воздействий пожара.

Каркасные системы в сравнении со стеновыми имеют ряд преимуществ: меньшая материалоемкость и затесненность опорами, позволяющие реализовывать практически любые архитектурные решения с меньшей стоимостью. При этом железобетонные конструкции по сравнению со стальными каркасами характеризуются меньшим расходом стали и большей огнестойкостью. В настоящее время сборный железобетонный каркас широко применяется в промышленном строительстве, реже – в гражданском строительстве, а монолитный – преимущественно в гражданском строительстве для жилых и общественных многоэтажных зданий. Железобетонные монолитные перекрытия выполняют в основном плоскими сплошными, опирают на систему балок, поддерживаемую стенами и стойками, или непосредственно на стены и стойки. По способу устройства различают ребристые, часторебристые, кесонные, сетчатые, шатровые и безбалочные перекрытия [1].

Из многообразия предъявляемых к зданиям технических требований (прочность, устойчивость, долговечность и др.) важными являются требования пожарной безопасности, в частности, к огнестойкости строительных конструкций, которые должны соблюдаться на протяжении всего жизненного цикла объекта строительства². Требования по огнестойкости предусматриваются в целях сохранения общей устойчивости несущих и ограждающих элементов здания для обеспечения безопасной эвакуации людей в случае пожара и создания условий для тушения пожара пожарными аварийно-спасательными подразделениями.

Благодаря развитию технологий строительства зданий и появлению новых видов сборных и сборно-монолитных железобетонных конструкций вопрос исследования их огнестойкости является актуальным [2–9]. Вместе с тем следует подчеркнуть недостаточность имеющихся в настоящее время работ по огнестойкости железобетонных перекрытий, образованных железобетонными монолитными конструкциями. Известна работа Е.М. Ларби³ в этой области, которая посвящена численному моделированию многоэтажных монолитных зданий и разработке предложений по расчету огнестойкости железобетонных монолитных конструкций с новыми видами арматуры, а также методики расчета огнестойкости монолитных каркасных зданий с учетом физической нелинейности бетона и арматуры при нагреве и охлаждении. Однако результаты указанной работы основаны на теоретических исследованиях и компьютерном моделировании без проведения огневых испытаний фрагментов монолитных зданий, выполненных в натуральную величину. Упругопластическая работа железобетона, нестационарный прогрев, склонность бетона к хрупкому (взрывообразному) разрушению, – все это может привести к переоценке огнестойкости монолитных зданий и их преждевременной потере несущей способности и устойчивости при пожаре.

Известен ряд исследований огнестойкости натуральных фрагментов каркасных зданий, выполненных работниками государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» (УГЗ МЧС). В частности, исследования огнестойкости каркасных зданий Б1.020.1-7, выполненные авторским коллективом работников РУП «Институт БелНИИС», УГЗ МЧС и учреждения «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», позволили изучить поведение сборно-монолитных перекрытий с различными вариантами сборных многослойных плит и оценить перемещения при температурном воздействии, близком к стандартному температурному режиму пожара, разработать подходы по оценке предельного напряженно-деформированного состояния заземленных железобетонных изгибаемых элементов, а также разработать предложения по их конструированию [2; 10–11].

В целом полноценные экспериментально-теоретические исследования огнестойкости железобетонных монолитных перекрытий с реальными условиями передачи нагрузок и усилий в литературе не встречаются, поэтому такие исследования являются актуальной научно-практической задачей, решение которой необходимо для апробации имеющихся теоретических исследований, разработки оптимальных конструктивных решений с целью повышения устойчивости монолитных зданий, сооружений и их частей при воздействии пожара.

² Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ*: принят 02.07.2013: вступ. в силу 01.08.2010 / постановление Совета Министров Респ. Беларусь. – Минск: Госстандарт, 2015. – 25 с.

³ Ларби, Е.М. Огнестойкость монолитных железобетонных конструкций зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Е.М. Ларби. – Харьков, 2001. – 209 л.

Основная часть

Моделирование и проектирование железобетонного перекрытия. Для достижения поставленной цели была разработана модель-аналог реального 2-этажного здания с каркасной конструктивной схемой, широко применяемой в настоящее время в современном строительстве [12–14]. С учетом разнообразия известных видов железобетонных монолитных перекрытий наиболее распространенными и экономически обоснованными являются плоские монолитные перекрытия с опиранием непосредственно на колонны. Сетка колонн в таких зданиях принимается, как правило, близкой к $6,0 \times 6,0$ м, толщина перекрытия – 160...200 мм, но не менее $l/32$, где l – расчетный пролет.

Железобетонный каркас модели-аналога был принят размером 30×20 м, с сеткой колонн $6,0 \times 6,0$ м, с монолитным перекрытием толщиной 200 мм и колоннами 400×400 мм. Полезная нагрузка на перекрытие была принята выше средней для общественных зданий в расчетных значениях $10,0 \text{ кН/м}^2$ (включающей $4,0 \text{ кН/м}^2$ постоянной нагрузки с коэффициентом надежности по нагрузке 1,35 и $6,0 \text{ кН/м}^2$ переменной нагрузки с коэффициентом надежности по нагрузке 1,5). Значение переменной нагрузки соответствует максимальным значениям для категорий А, С2 и минимальным значениям для категории D⁴, либо помещениям с возможным скоплением людей⁵.

Моделирование фрагмента железобетонного монолитного перекрытия выполняли с использованием некоммерческой свободно распространяемой версии программного комплекса (далее – ПК) ЛИРА-САПР 2013 R5. Выбор программного комплекса основывался на результатах работ [15; 16], которые свидетельствуют об удовлетворительной сходимости результатов расчета с классическими расчетными моделями, соответствии требованиям технических нормативных правовых актов (далее – ТНПА), а также возможности расчета усилий, деформаций и армирования железобетонных конструкций.

Общий вид расчетной модели-аналога представлен на рисунке 1. При расчете использовали линейно-упругую модель материалов, абсолютно жесткое защемление колонн в фундаментных створах и абсолютно жесткое сопряжение конечных элементов (далее – КЭ) перекрытия с КЭ колонн в пределах их сечения (400×400 мм). Колонны моделировали цельными стержневыми КЭ (тип 10), перекрытия – плоскими КЭ (тип 41), размером в плане 200×200 мм. В соответствии с требованиями п. 7.1.3.4 СНБ 5.03.01⁶ жесткость колонн была принята с коэффициентом 0,7, а жесткость перекрытий – с коэффициентом 0,25 по отношению к исходному модулю упругости бетона, принятому равным 30 ГПа для класса по прочности C²⁰/₂₅. Для задания нагрузки использовали таблицы расчетных сочетаний нагрузок (5 сочетаний) и расчетных сочетаний усилий (4 сочетания) в соответствии с требованиями белорусских и российских ТНПА.

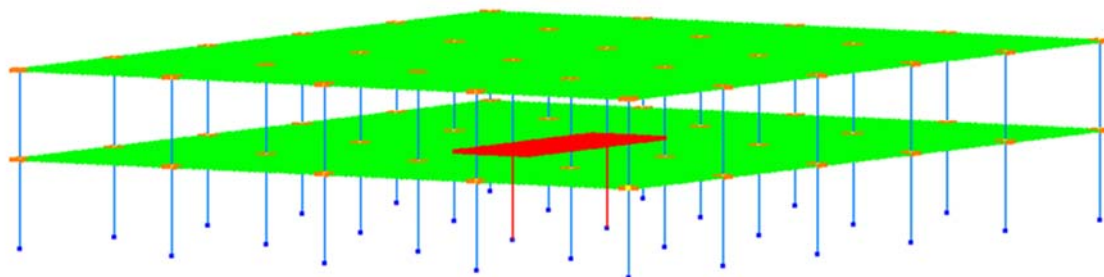


Рисунок 1. – Общий вид расчетной модели-аналога 2-этажного здания с каркасной конструктивной схемой в ПК ЛИРА-САПР 2013 R5. Исследуемая часть перекрытия выделена красным цветом

Распределение изгибающих моментов в линейно-упругой постановке во фрагменте железобетонного перекрытия размером $8,8 \times 2,8$ м, расположенного в середине 1-го этажа, представлено на рисунке 2 (см. также рис. 1). Результаты расчетов приведены для особого сочетания нагрузок, используемого для расчета огнестойкости, с коэффициентами надежности, равными: 1,0 – для постоянных нагрузок, 0,5 – для переменных нагрузок.

⁴ Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-1. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий: ТКП EN 1991-1-1-2016 (33020). – Взамен СТБ EN 1991-1-1-2007; введ. 11.03.16. – Минск: Минстройархитектуры, 2016. – 48 с.

⁵ Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. – Взамен СНиП II-674; введ. 01.01.87. – М.: ЦНИИСК, 2004 – 37 с.

⁶ Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Взамен СНиП 2.03.01-84; введ. 01.07.03. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 140 с.

Расчет армирования осуществляли для двух вариантов: по белорусским и российским ТНПА (с выбором в сторону большей площади армирования), с учетом I и II групп предельных состояний. При этом для расчетов по требованиям белорусских ТНПА использовали армирование с классом прочности S500⁷ и бетон класса прочности C²⁰/₂₅, в то время как по российским ТНПА использовали аналогичные материалы – арматуру класса А500⁸ и бетон с классом прочности В25. Во всех случаях использовали расчет арматуры по теории Вуда с усредненным расстоянием до оси продольной и поперечной арматуры 30 мм, минимальный и максимальный процент армирования сечений соответственно 0,13 и 10 %, билинейную диаграмму деформирования бетона.

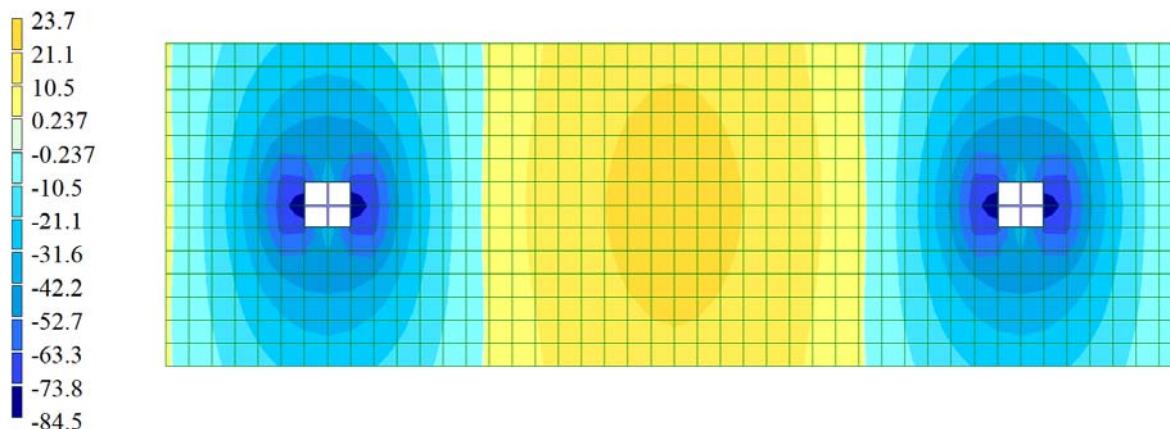


Рисунок 2. – Распределение изгибающих моментов в исследуемой части железобетонного перекрытия размером 8,8×2,8 м модели-аналога многопролетной каркасной схемы здания для особого расчетного сочетания нагрузок

Окончательно армирование было принято следующим:

нижнее армирование – фоновая арматурная сетка из стержней диаметром 10 мм с шагом 200 мм, дополнительное армирование в середине пролета – учащение шага стержней поперек пролета до 100 мм;

верхнее армирование – фоновая арматурная сетка из стержней диаметром 10 мм с шагом 200 мм; дополнительное армирование в опорной области – учащение шага стержней вдоль и поперек пролета до 100 мм, между которыми устанавливали арматурные стержни диаметром 16 мм также с шагом 100 мм (таким образом, расстояние между осями стержней составляло 50 мм).

Дополнительно были проведены расчеты железобетонного перекрытия на продавливание в опорных областях и определено количество вертикальной поперечной арматуры – не менее 48 стержней диаметром 10 мм в радиусе 500 мм от грани колонн.

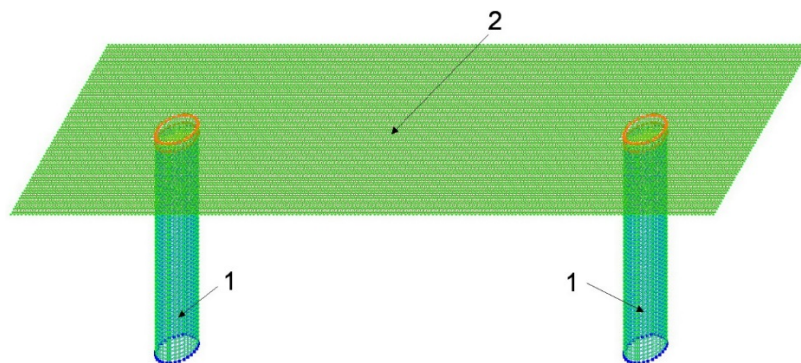
Исследуемая часть перекрытия была перенесена из многопролетной каркасной схемы здания путем фрагментации (отсечения фрагмента диска перекрытия), преобразована в однопролетную схему с расчетным пролетом 6,0 м и консольными свесами по 1,5 м. Размер перекрытия в плане составил 3,0×9,0 м, толщина перекрытия – 200 мм. Исследования огнестойкости железобетонной монолитной плиты перекрытия были объединены с исследованиями огнестойкости сборных железобетонных центрифугированных колонн наружным диаметром 560 мм и толщиной стенки 55 мм производства ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» [17]. Высота фрагмента в свету (2,75 м) была обусловлена высотой центрифугированных железобетонных колонн (исследование огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн не является предметом настоящей статьи, см. работу [17] и др.).

Для полученной однопролетно-консольной схемы перекрытия с жестким сопряжением с центрифугированными колоннами в ПК ЛИРА-САПР 2013 R5 была разработана собственная линейно-упругая модель, представленная на рисунке 3.

⁷ Арматура ненапрягаемая для железобетонных конструкций. Технические условия: СТБ 1704-2012. – Взамен СТБ 1704-2006; введ. 01.01.13. – Минск: Минсктиппроект, 2013. – 20 с.

⁸ Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия: ГОСТ 34028-2016. – Взамен ГОСТ 5781-82, ГОСТ 10884-94; введ. 08.12.16. – Минск: БелГИСС, 2016. – 46 с.

Расчетная модель включала 2 центрифугированные железобетонные колонны, представленные КЭ пластин (тип 41) толщиной 55 мм, расположенными по окружности диаметром 505 мм, а также железобетонное монолитное перекрытие с консольными свесами, выполненным с применением КЭ пластин (тип 41) толщиной 200 мм. Модуль упругости бетона в соответствии с требованиями п. 7.1.3.4 СНБ 5.03.01⁹ для колонн был принят равным 25,0 ГПа, модуль упругости перекрытия – 7,5 ГПа. Все КЭ пластины были предусмотрены размером 50×50 мм. Створы каждой колонны в фундаментах приняты жестко защемленными, сопряжение с перекрытием – через массив 65 точек, связанных в абсолютно жесткое тело и 16 численных конечных элементов абсолютно жестких тел (тип 10) – для учета работы бетонной шпонки высотой 400 мм.



1 – железобетонные центрифугированные колонны; 2 – железобетонное монолитное перекрытие
Рисунок 3. – Общий вид расчетной модели – экспериментального фрагмента

Для перекрытия были приняты нагрузки исходя из условия максимального приведения в соответствие значений изгибающих моментов в пролете для особого расчетного сочетания нагрузок модели-аналога 2-этажного многопролетного здания. При этом собственный вес перекрытия был принят с коэффициентом надежности 1,35 для учета веса арматуры, отклонений геометрии и возможных наплывов бетона. Результаты расчетов показали, что полезная нагрузка со значением 6,63 кН/м² показывает удовлетворительную сходимость по изгибающим моментам с моделью-аналогом (см. рис. 2). Кроме того, для увеличения нагрузки на центрифугированные колонны над ними принята сосредоточенная нагрузка интенсивностью 28,25 кН/м² [17]. Распределение изгибающих моментов для экспериментального фрагмента представлено на рисунке 4.

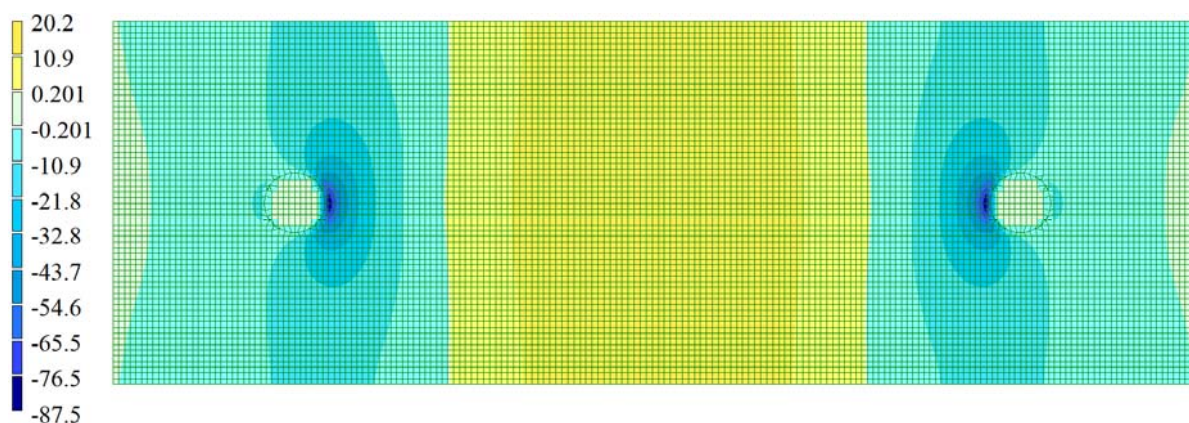


Рисунок 4. – Распределение изгибающих моментов в железобетонном перекрытии для экспериментального фрагмента

Представленная полезная нагрузка в силу различия расчетных схем между однопролетной консольной и многопролетной схемой видится авторам статьи удовлетворительно рассчитанной, т.к. максимальное значение изгибающего момента на опоре и в пролете плиты в сравнении с многопролетной схемой соответственно увеличилось на 3,0 кН·м (3,6 %) и снизилось на 3,5 кН·м (14,8 %), а также соответствует кратному количеству грузов массой 480 кг. При этом разность в сумме пролетного и одного из опорных моментов составила 0,5 кН (0,5 %) – что свидетельствует о равном потенциале перераспределения усилий в ходе

⁹ См. сноску 4.

возможного огневого воздействия. Это свидетельствует о близком соответствии однопролетного перекрытия аналогу из реальной многопролетной схемы, что также подтверждается значениями расчетных прогибов в линейно-упругой постановке (отличие на 2,26 мм (19 %), рис. 5). Таким образом можно говорить о максимальной согласованности однопролетной расчетной схемы с многопролетной.

Конструкция железобетонного монолитного перекрытия, характеристики материалов были приняты полностью идентичными исследуемому фрагменту модели-аналога 2-этажного многопролетного каркаса здания. Проведены поверочные расчеты требуемого армирования для экспериментального фрагмента, которые показали достаточность принятых конструктивных решений. При этом для экспериментального фрагмента были предусмотрены незначительные конструктивные изменения для соответствия требованиям ТНПА – по контуру перекрытия в виде П-образных хомутов¹⁰, обеспечивающих восприятие крутящих моментов у края перекрытия и необходимую анкеровку концевых участков арматуры, а также загиб и увязка арматурных выпусков из центрифугированных колонн.

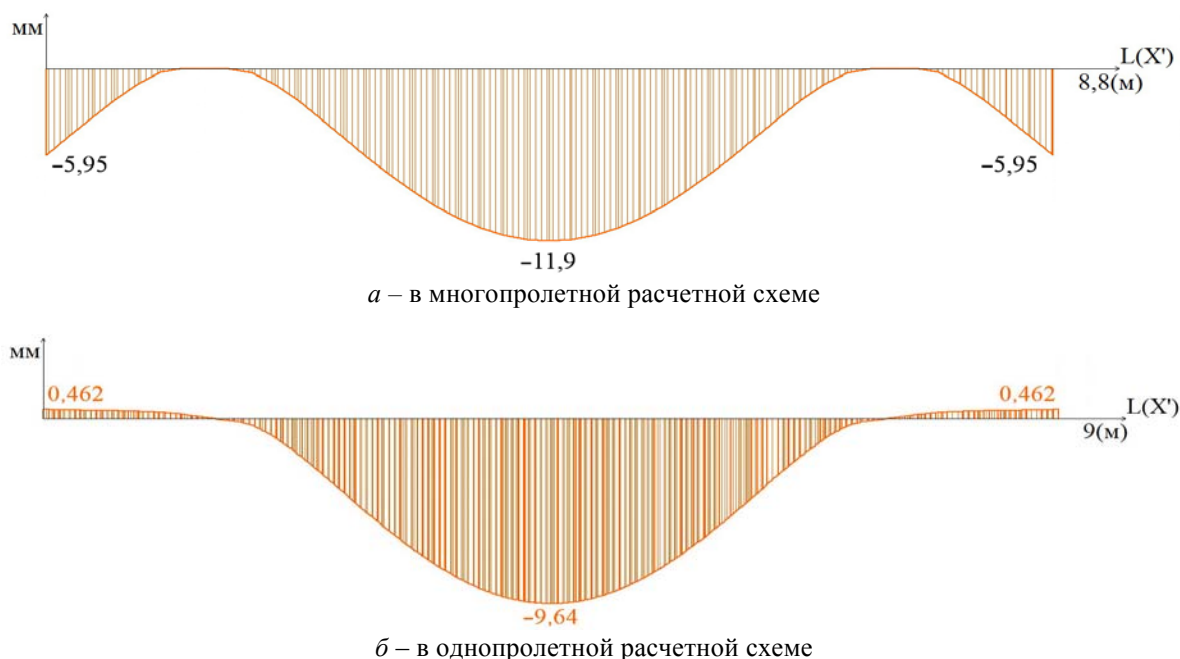


Рисунок 5. – Распределение прогибов в железобетонном перекрытии между осями колонн

Планы и схемы армирования железобетонного монолитного перекрытия экспериментального фрагмента представлены на рисунках 6–8.

Расчет огнестойкости перекрытия произведен с учетом перераспределения усилий между опорным и пролетными сечениями. Аналогичный подход был успешно применен для расчета железобетонных статически неопределимых сборно-монолитных конструкций в сопоставлении с натурными огневыми испытаниями [2; 10; 11; 20], а также приведено в Руководстве по расчету статически неопределимых конструкций¹¹. Несущую способность перекрытия при пожаре **R** определяли исходя из условия прочности $M_{Rd}^{\Sigma}(\Theta) \geq M_{Sd}^{\Sigma}(\Theta)$ с использованием метода предельного равновесия для 150 мин стандартного огневого воздействия:

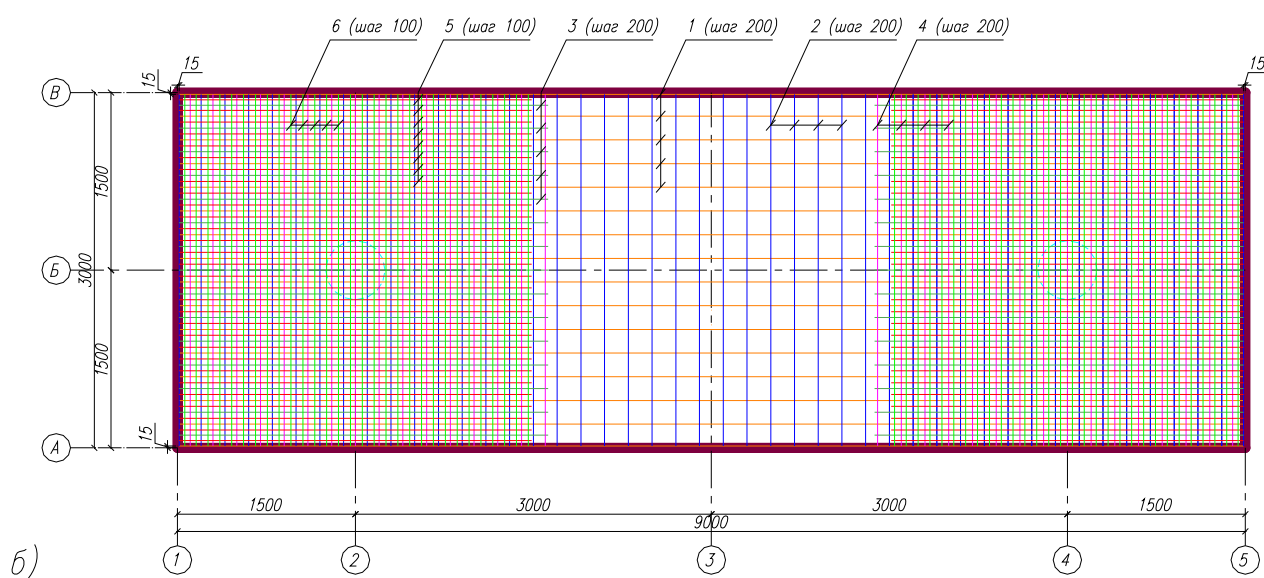
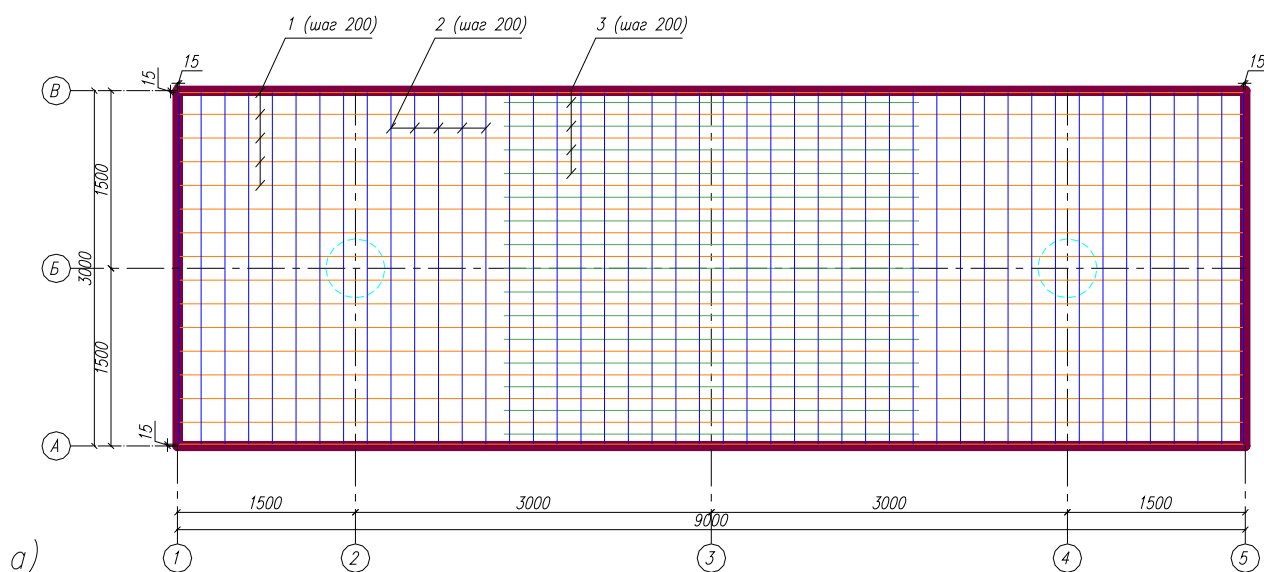
$$\begin{aligned} M_{Rd}^{\Sigma}(\Theta) &= M_{Rd}^{sp}(\Theta) + M_{Rd}^{supp} = 14,1 + 121,0 = 135,1 \text{ (кН} \cdot \text{м)}, \\ M_{Sd}^{\Sigma}(\Theta) &= M_{Sd}^{sp}(\Theta) + M_{Sd}^{supp} = 19,5 + 89,4 = 108,9 \text{ (кН} \cdot \text{м)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $M_{Rd}^{\Sigma}(\Theta)$ – суммарная прочность сечений, кН·м; $M_{Rd}^{sp}(\Theta)$ – прочность пролетного сечения, кН·м; $M_{Rd}^{supp}(\Theta)$ – прочность одного из опорных сечений (при их равенстве) либо сред-

¹⁰ Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009; введ. 01.01.10. – Минск: Мистройархитектуры, 2015. – 206 с.

¹¹ Руководство по расчету статически неопределимых конструкций. – М.: НИИЖБ, 1975 – 194 с.

нее арифметическое прочности обоих опорных сечений, кН·м; $M_{\Sigma d}^{\Sigma}(\Theta)$ – суммарный изгибающий момент в сечениях, кН·м; $M_{\Sigma d}^{sp}(\Theta)$ – изгибающий момент в пролетном сечении, кН·м; $M_{\Sigma d}^{supp}(\Theta)$ – изгибающий момент в одном из опорных сечений (при их равенстве) либо среднее арифметическое изгибающих моментов обоих опорных сечений, кН·м.



Спецификация к схеме расположения нижней арматуры

Поз.	Наименование	Кол.	Масса ед., кг
	Детали		
1	10 S500 СТБ 1704-2012 L=8970	16	5.53
2	10 S500 СТБ 1704-2012 L=2970	46	1.83
3	10 S500 СТБ 1704-2012 L=3500	15	2.16

Спецификация к схеме расположения верхней арматуры

Поз.	Наименование	Кол.	Масса ед., кг
	Детали		
1	10 S500 СТБ 1704-2012 L=8970	16	5.53
2	10 S500 СТБ 1704-2012 L=2970	46	1.83
3	10 S500 СТБ 1704-2012 L=3110	30	1.92
4	10 S500 СТБ 1704-2012 L=2970	32	1.83
5	16 S500 СТБ 1704-2012 L=2970	60	4.69
6	16 S500 СТБ 1704-2012 L=2970	60	4.69

а) – у нижней грани плиты; б) – у верхней грани плиты

Рисунок 6. – Армирование монолитного перекрытия экспериментального фрагмента

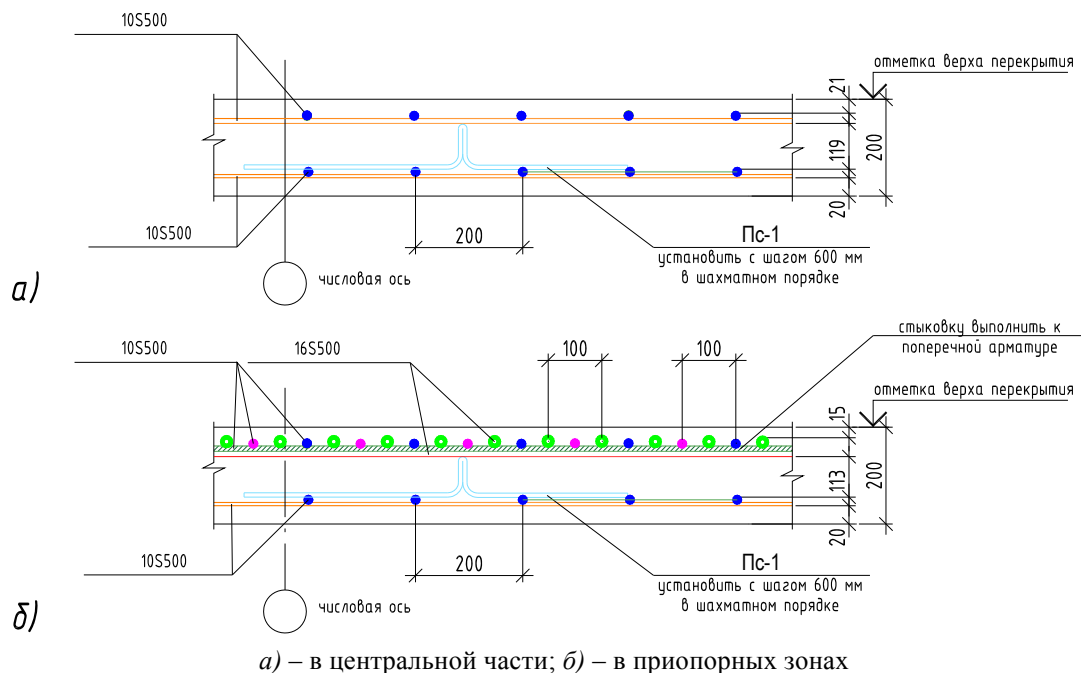


Рисунок 7. – Поперечное сечение монолитного перекрытия экспериментального фрагмента

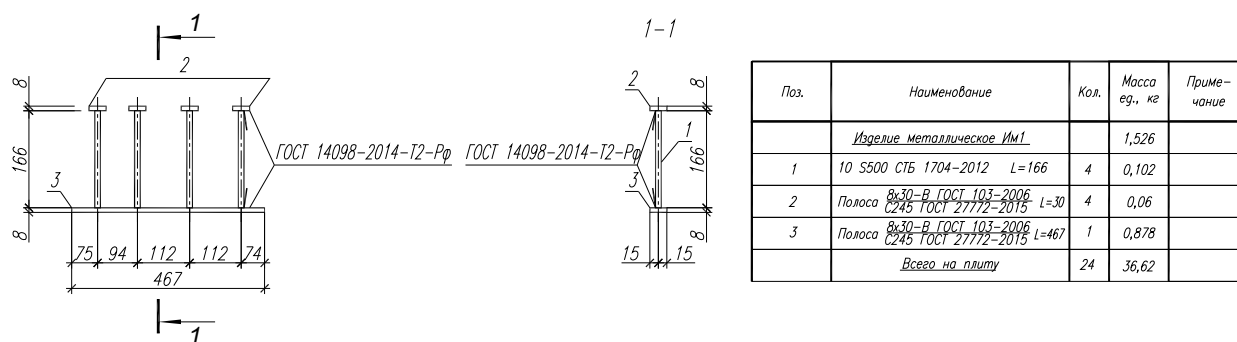


Рисунок 8. – Схема арматурных изделий, устанавливаемых в опорных участках монолитного перекрытия экспериментального фрагмента

Как следует из формулы (1), а также с учетом огнестойкости по теплоизолирующей способности **EI** в соответствии с данными таблицы 6.3 ТКП 45-2.02-110¹², спроектированное железобетонное монолитное перекрытие с учетом потенциала перераспределения усилий при пожаре отвечает огнестойкости **REI 150**.

Таким образом, на основе результатов сопоставительного конечно-элементного моделирования и сопутствующих расчетов разработана конструкция железобетонной монолитной плиты перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания, включающего сборные центрифугированные колонны, для дальнейшего исследования огнестойкости в рамках натурных огневых испытаний, приближенных к стандартному температурному режиму пожара.

Возведение железобетонного монолитного перекрытия. До возведения экспериментального фрагмента каркасного здания были подготовлены железобетонные монолитные стаканы, в которые в последующем были установлены 2 сборные центрифугированные железобетонные колонны производства ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» [17].

¹² Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Взамен ПП-02 к СНБ 2.02.01-98. – Введ. 12.06.08. – Минск: Минсктипроект, 2008. – 126 с.

Для возведения железобетонной монолитной плиты перекрытия применяли съемную систему инвентарной опалубки¹³, включающую телескопические стойки с треногами, деревянные балки в виде двутавров, ламинированные фанерные щиты. Установку арматурных изделий в опалубку осуществляли в соответствии с результатами конструирования, представленными выше. С целью обеспечения требуемого защитного слоя бетона для нижней продольной арматуры (20 мм) применяли пластиковые фиксаторы защитного слоя арматуры типа «опоры» 25/20/15/10 мм. Сварные изделия для поперечного армирования устанавливали исходя из результатов расчета на продавливание, крепили в проектное положение к нижнему ряду арматурной сетки посредством вязальной проволоки (рис. 9).



Рисунок 9. – Армирование опорных участков монолитного перекрытия экспериментального фрагмента

Для установки верхней сетки арматурного каркаса в проектное положение и обеспечения минимального требуемого защитного слоя 15 мм сверху применяли гнутые зигзагообразные закладные детали Пс-1 высотой по внешним граням 113 мм (устанавливали в приопорных зонах верхнего дополнительного армирования диаметром 16 мм) и высотой 119 мм (на остальной площади плиты), изготовленные механическим способом на электромеханическом гибочном станке из стержневой арматуры диаметром 8 мм. Указанные изделия устанавливали в шахматном порядке с шагом 600 мм (рис. 7). Процесс установки верхнего ряда арматуры представлен на рисунке 10.



Рисунок 10. – Процесс установки верхнего ряда арматуры монолитного перекрытия экспериментального фрагмента

¹³ Опалубка для возведения монолитных бетонных и железобетонных конструкций. Общие технические условия: СТБ 1110-98. – Взамен ГОСТ 23477-79, ГОСТ 23478-79; введ. 01.03.99. – Минск: СтройМедиаПроект, 2015. – 24 с.

Все арматурные и закладные изделия устанавливали в соответствии с планом раскладки и соединяли вязальной проволокой согласно требованиям¹⁴.

Для оценки прогрева плиты перекрытия до этапа бетонирования к арматурным изделиям крепили термоэлектрические преобразователи ТХА(К)-1199/51 2/500/3/3.5 (-40...+1000 °С) и КТНН 02.01-050-к1-И-Т740-3-100/11000 (-40...+800 °С) вязальной проволокой параллельно оси арматуры, часть датчиков устанавливали на необогреваемой поверхности плиты.

Бетонирование осуществляли 27.10.2019 готовой бетонной смесью тяжелого бетона (БСГТ) с заполнителем из щебня наибольшей крупностью 20 мм и маркой по удобоукладываемости ПЗ, группой по сохраняемости удобоукладываемости St-4 и удобоукладываемостью у места укладки 15 см (при подвижности по осадке стандартного конуса у места укладки 15 см). Бетонную смесь подавали в опалубку автобетононасосом с распределительной стрелой одним слоем без перерывов при окружающей температуре воздуха +15 °С и относительной влажности воздуха 68–72 %. Уплотнение бетонной смеси производили глубинным вибратором до появления на ее поверхности блеска и прекращения ее осадения, поверхность разравнивали деревянной гладилкой. Часть бетонной смеси была уложена в формы¹⁵ для изготовления контрольных образцов-кубов с длиной ребер 100 мм. По мере бетонирования в середине пролета, с одной стороны, образовалась незначительная просадка телескопических стоек в грунт. Обнаруженная просадка была откорректирована укреплением основания.

Первые 6 дней твердения бетон подвергали влажностному уходу, а затем укрывали полиэтиленовой пленкой. На протяжении последующих 28 суток температура окружающего воздуха не поднималась выше +15 °С и не опускалась ниже +5 °С, поэтому дополнительные меры по уходу за бетоном не применяли. Распалубку плиты перекрытия производили 13.11.2019 в возрасте 17 суток, при этом делали контрольную оценку прочности бетона с помощью неразрушающего контроля методом ударного импульса прибором ОНИКС-2.5 (6 захваток по 15 ударов на захватку), которая составила в среднем не менее 29 МПа¹⁶. После распалубки участки неуплотненного бетона обнажение арматуры и трещины визуальным осмотром выявлены не были.

Контроль толщины защитного слоя у нижней грани проводили магнитным методом¹⁷ с применением измерителя защитного слоя бетона ИПА-МГ4 (ООО «СКБ Стройприбор»). Измерения проводили в ячейках с шагом 750 мм и в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора. В результате проведенного контроля при известном диаметре продольной арматуры толщина защитного слоя бетона составила $20,83 \pm 0,25$ мм, что говорит об обеспечении проектного значения. Полученные результаты позволили установить, что частичная просадка опалубки, обнаруженная на этапе бетонирования, не привела к изменению толщины защитного слоя арматуры.

Точная геометрия (ординаты нижних и верхних точек) перекрытия после снятия опалубки была определена с применением лазерного нивелира и металлической линейки длиной 250 мм в ячейках с шагом 750 мм с точностью 1,0 мм (рис. 11). Результаты измерений показали, что нижняя плоскость перекрытия отклонялась от условного нуля в точке одной из опор в среднем на $19,9 \pm 2,5$ мм, в то время как верх перекрытия от указанной точки отклонялся в среднем на $9,9 \pm 1,7$ мм. Разность в высотных отметках по колоннам составила в среднем 3,0 мм, максимальное отклонение центра тяжести перекрытия – 58 мм (при неизменной толщине перекрытия, в месте просадки опалубки).

Для создания внутреннего объема (огневой камеры) по периметру фрагмента до низа перекрытия были возведены самонесущие стены из газосиликатных блоков толщиной 200 мм (рис. 12). В середине поперечных стен на высоте 1000 мм от уровня фундамента

¹⁴ Арматурные и закладные изделия, их сварные, вязанные и механические соединения для железобетонных конструкций. Общие технические условия: ГОСТ 10922-2012. – Взамен ГОСТ 10922-90; введ. 01.02.16. – Минск: СтройМедиаПроект, 2015. – 33 с.

¹⁵ Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия: ГОСТ 22685-89. – Взамен ГОСТ 22685-77; введ. 01.01.90. – Минск: БелГИСС, 2018. – 15 с.

¹⁶ Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012. – Взамен ГОСТ 22690-88; введ. 01.01.13. – Минск: Стройтехнорм, 2019. – 23 с.

¹⁷ Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры: ГОСТ 22904-93. – Взамен ГОСТ 22904-78; введ. 01.01.95. – Минск: Минсктиппроект, 1994. – 13 с.

устанавливали два оконных проема размером 800×1250 мм каждый; в продольных стенах напротив колонн на высоте 1750 мм от уровня фундамента – проемы размером 500×500 мм; в середине одной из продольных стен – дверной проем размером 1000×2000 мм [18]. По углам стен были предусмотрены пилоны для обеспечения их устойчивости при пожаре.



Рисунок 11. – Измерение ординаты нижних и верхних точек перекрытия после снятия опалубки



Рисунок 12. – Процесс возведения ограждающих конструкций фрагмента каркасного здания

Непосредственно перед проведением испытаний 04.01.2020 выполняли измерения влажности железобетонного перекрытия диэлькометрическим методом с применением влагомера Testo 606-1 в соответствии со стандартизованной методикой¹⁸. По результатам выполненных измерений влажность бетона составила $7,4 \pm 1,7 \%$.

Работы по подготовке фрагмента каркаса к испытаниям были завершены 03.01.2020.

Таким образом, на основании разработанных проектных данных и проведенных расчетов была сконструирована и возведена конструкция железобетонного монолитного перекрытия с теоретическим пределом огнестойкости **REI 150** в составе экспериментального фрагмента каркасного здания, включающего сборные центрифугированные колонны, для исследования огнестойкости в рамках натурных огневых испытаний, приближенных к стандартному температурному режиму пожара.

Заключение

Монолитные каркасные железобетонные системы зданий в настоящее время одни из наиболее распространенных при строительстве многоэтажных зданий. Они имеют явные преимущества по сравнению с классическими сборными стеновыми строительными системами. Указанные монолитные железобетонные системы обладают высокой потенциальной огнестойкостью, при этом экспериментальные исследования ввиду сложности воссоздания реальных условий сопряжения и нагружения, практически не проводились. Таким образом, существующие теоретические положения по конструированию огнестойких железобетонных монолитных перекрытий требуют подтверждения. Для достижения этой

¹⁸ Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности: ГОСТ 21718-84. – Взамен ГОСТ 21718-76, ГОСТ 23422-79; введ. 01.07.85. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 8 с.

цели авторами настоящей работы был спроектирован и возведен фрагмент каркасного здания, включающий 2 сборные центрифугированные железобетонные колонны производства ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» и железобетонное монолитное однопролетное перекрытие с консольными свесами размерами 9,0×3,0 м (с расстоянием между опорами 6,0 м).

Для наиболее полного соответствия экспериментальной плиты перекрытия реальным примерам проектирования была разработана модель двухэтажного многопролетного каркасного здания размером 30,0×20,0 м с сеткой 6,0×6,0 м под расчетную нагрузку 10 кН/м², центральный фрагмент которого на уровне первого этажа и был выбран в качестве испытываемого фрагмента. При этом конструкция железобетонного монолитного перекрытия, характеристики материалов были приняты полностью идентичными исследуемому фрагменту модели-аналога 2-этажного многопролетного каркаса здания.

Армирование было предусмотрено из стержней класса S500 по прочности, при этом фоновое нижнее и верхнее армирование представляло собой сетку из стержней диаметром 10 мм, уложенных с шагом 200 мм, а также дополнительное усиление средней части пролета плиты (3,5×3,0 м) с шагом 200 мм (шаг стержней диаметром 10 мм таким образом был уменьшен до 100 мм), а также усиление опорной части размером 3,0×3,0 м (шаг стержней диаметром 10 мм уменьшен до 100 мм, а между ними дополнительно уложены стержни диаметром 16 мм). Бетон был предусмотрен класса по прочности на сжатие C²⁰/₂₅. Для рассматриваемого фрагмента перекрытия был произведен расчет огнестойкости, спроектированное железобетонное монолитное перекрытие с учетом потенциала перераспределения усилий при пожаре соответствует огнестойкости REI 150.

В период с 27.10.2019 по 04.01.2020 указанное перекрытие было возведено с соблюдением реальных технологий строительства монолитных железобетонных каркасов и подготовлено к испытаниям.

Авторы выражают огромную благодарность за помощь в организации и проведении моделирования, расчетов, конструирования и испытаний И.И. Полеводе, Д.С. Неханю, Д.И. Навою, О.А. Труссу, М.М. Журову, Н.М. Олесиюку, Л.А. Крееру, Д.С. Игнатовичу, А.С. Дробышу, А.Е. Лупандину, А.М. Борейко, А.Н. Челаку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буга, П.Г. Гражданские, промышленные и сельскохозяйственные здания: учебник / П.Г. Буга. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1987. – 351 с.
2. Жовна, В.В. Огнестойкость железобетонных каркасов зданий с плоскими сборно-монолитными перекрытиями, образованными многопустотными плитами / В.В. Жовна [и др.] // Строительная наука и техника. – 2006. – № 4(7). – С. 42–51.
3. Allam, S.M. Behavior of one-way reinforced concrete slabs subjected to fire / S.M. Allam, H.M.F. Elbakry, A.G. Rabeai // Alexandria Engineering Journal. – 2013. – Vol. 52, Iss. 4. – P. 749–761. DOI: 10.1016/j.aej.2013.09.004.
4. Venanzi, I. Fire performance assessment of HPLWC hollow core slabs through full-scale furnace testing / I. Venanzi, M. Breccolotti, A. D'Alessandro, A.L. Materazzi // Fire Safety Journal. – 2014. – Vol. 69. – P. 12–22. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.07.004.
5. Гравит, М.В. Огнестойкость сборно-монолитных часторебристых плит по балкам со стальным профилем / М.В. Гравит [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 12(51). – С. 73–83. DOI: 10.18720/CUBS.51.6.
6. Полевода, И.И. Результаты испытания на огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова, Н.И. Чайчиц // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 37–44.
7. Hertz, K.D. Fire resistance of extruded hollow-core slabs / K.D. Hertz, L.S. Sørensen, L. Giuliani // Journal of Structural Fire Engineering. – 2017. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 324–336. DOI: 10.1108/JSFE-07-2016-0009.
8. Nedviga, E. Fire Resistance of Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slabs of “Marko” Technology / E. Nedviga, N. Beresneva, M. Gravit, A. Blagodatskaya // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. – Advances

- in Intelligent Systems and Computing, Vol. 692. – Springer, Cham. – 2018. – P. 739–749. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_78.
9. Li, B. Fire behavior of the assembled monolithic hollow-ribbed slabs / B. Li, Y.Q. Lin, H.L. Zhang, M.J. Ma // *Advances in Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 1. – P. 1–10. DOI: 10.1155/2019/8921502.
 10. Жовна, В.В. Экспериментальные испытания железобетонных сборно-монолитных плоских перекрытий, образованных многопустотными плитами для определения фактических пределов огнестойкости конструкций / В.В. Жовна [и др.] // *Строительная наука и техника*. – 2007. – № 4(13). – С. 43–50.
 11. Кудряшов, В.А. Оценка огнестойкости сборно-монолитного перекрытия со сборными многопустотными плитами / В.А. Кудряшов // *Строительная наука и техника*. – 2008. – № 4(19). – С. 37–42.
 12. Абрамян, С.Г. Сборные и сборно-монолитные каркасные системы высотных зданий с плоскими плитами перекрытия [Электронный ресурс] / С.Г. Абрамян, Д.В. Гнатюк // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 1. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/83TVN117.pdf>. – Дата доступа: 06.10.2019.
 13. Antonov, A.A. Framing Systems in Residential Construction / A.A. Antonov, M. Molodtsov, V. Molodtsova // *Procedia Engineering*. – 2016. – №. 150. – P. 2138–2145. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.254.
 14. Шубин, А.А. Формула индустриализации строительства: высокая скорость + низкая себестоимость = УДС / А.А. Шубин // *Технологии бетонов*. – 2013. – № 9(86). – С. 32–35.
 15. Городецкий, Д.А. Программный комплекс ЛИРА-САПР: учеб. пособие / Д.А. Городецкий [и др.]. – Киев – М.: Электронное издание, 2013. – 376 с.
 16. Давидюк, А.А. Подбор армирования в плитах перекрытия в программных комплексах ЛИРА-САПР, SCAD, ЛИРА 10 / А.А. Давидюк, Е.А. Артемьев, С.В. Шокот // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2018. – № 10. С. 69–73.
 17. Полевода, И.И. Результаты натурных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 142–159. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
 18. Нехань, Д.С. Исследования температуры газовой среды при проведении натурных огневых испытаний строительных конструкций / Д.С. Нехань [и др.] // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 130–141. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
 19. Кудряшов, В.А. Расчетная оценка огнестойкости железобетонных плоских сборно-монолитных перекрытий / В.А. Кудряшов. // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2009. – № 1 (9). – С. 93–97.

**Конструирование железобетонного монолитного перекрытия в составе фрагмента
каркасного здания для исследований огнестойкости
в рамках натурных огневых испытаний**

**Cast-in-place reinforced concrete plate construction as a part
of a frame experimental building for fire resistance research**

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

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

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

e-mail: vadmud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Vadim A. Kudryashov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

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

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

e-mail: vadmud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Жамойдик Сергей Михайлович

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, г. Минск, Беларусь

e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

Sergey M. Zhamoydik

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, Minsk, Belarus

e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0407-5176

Кураченко Игорь Юрьевич

Учреждение «Научно-исследовательский
институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций» Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики
Беларусь, консультационный центр в области
обеспечения пожарной безопасности,
главный специалист

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

e-mail: i.kurachenko@yandex.by

ORCID: 0000-0002-2898-1811

Igor' Yu. Kurachenko

Research Institute of Fire Safety
and Emergencies of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus,
Fire Safety Advisory Center,
Chief Specialist

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

e-mail: i.kurachenko@yandex.by

ORCID: 0000-0002-2898-1811

Мордич Михаил Михайлович

кандидат технических наук

Филиал БНТУ «Научно-исследовательский
политехнический институт», научно-
исследовательская и испытательная
лаборатория бетонов и строительных
материалов, старший научный сотрудник

Адрес: ул. Франциска Скорины, 25, корп. 1,
220076, г. Минск, Беларусь

e-mail: Mikemor@tut.by

ORCID: 0000-0002-4214-9167

Mikhail M. Mordich

PhD in Technical Sciences

Branch of the BNTU «Research Division»,
Research and Testing Laboratory of Concrete
and Building Materials, Senior Researcher

Address: Frantsiska Skoriny str., 25, bldg. 1
220076, Minsk, Belarus

e-mail: Mikemor@tut.by

ORCID: 0000-0002-4214-9167

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.33>**CAST-IN-PLACE REINFORCED CONCRETE PLATE CONSTRUCTION AS A PART OF A FRAME EXPERIMENTAL BUILDING FOR FIRE RESISTANCE RESEARCH****Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Mordich M.M.**

Purpose. Based on the results of comparative numerical finite element modeling, to develop and construct a structure of a cast-in-place reinforced concrete slab with a theoretical fire resistance rate REI 150 as part of an experimental fragment of a frame building, including precast centrifuged columns, and to study fire resistance in the framework of full-scale fire tests, close to the standard temperature fire curve.

Methods. Analysis of the existing research results and methods. Numerical finite element modeling of reinforced concrete structures using LIRA-SAPR 2013 R5 software. Analogy method. Assessment of fire resistance by the limiting equilibrium method. Measuring the concrete cover thickness by magnetic method. Geometry measurements by laser leveling.

Findings. Cast-in-place frame reinforced concrete systems of buildings are currently the most common in the construction of multistory buildings; such systems have a high potential fire resistance, but due to the complexity of reconstruction of real conjugation and loading conditions experimental studies have not been carried out in practice. To solve this problem, the numerical finite element modeling of a plain reinforced concrete cast-in-place 200 mm thick slab as part of a 2-storey frame building with 6×6 m columns grid and 10 kN / m² load has been estimated. The required reinforcement of concrete cast-in-place slab has been calculated based on the stresses and design practice, as well as loadings combinations. A fragment of a reinforced concrete slab of 3×9 m size from the central part of the 1st floor of the frame was transferred by analogy into an experimental fragment, including two centrifuged reinforced concrete columns with 6.0 m span as supports and linked to them. The fire resistance rate of the slab, determined by the limit equilibrium method, taking into account the potential of redistribution of forces, was estimated higher than REI 150. On the basis of the design, a fragment of a frame building was constructed to study fire resistance within the framework of full-scale fire tests, close to the standard temperature fire curve.

Application field of research. The research results can be used for full-scale fire tests of the constructed fragment, design and construction of similar reinforced concrete cast-in-place, combined precast/cast-in-place flooring, in the development of methods for assessing the fire resistance of reinforced concrete structures.

Keywords: fire resistance, full-scale fire tests, cast-in-place reinforced concrete flooring, frame building, modeling, computational model, design, LIRA-SAPR, construction.

(The date of submitting: January 27, 2021)

REFERENCES

1. Buga P.G. *Grazhdanskie, promyshlennye i sel'skokhozyaystvennyye zdaniya* [Civil, industrial and agricultural buildings]: textbook. Moscow: Vysshaya shkola, 1987. 351 p. (rus)
2. Zhovna V.V., Shtykh A.A., Kudryashov V.A., Mordich A.I., Belevich V.N. Ognestoykost' zhelezobetonnnykh karkasov zdaniy s ploskimi sborno-monolitnymi perekrytiyami, obrazovannymi mnogopustotnymi plitami [Fire resistance of reinforced concrete frame structures with precast hollowcore slab floors]. *Construction science & engineering*, 2006. No. 4(7). Pp. 42–51. (rus)
3. Allam S.M., Elbakry H.M.F., Rabeai A.G. Behavior of one-way reinforced concrete slabs subjected to fire. *Alexandria Engineering Journal*, 2013. Vol. 52, No. 4. Pp. 749–761. (rus) DOI: 10.1016/j.aej.2013.09.004.
4. Venanzi I., Breccolotti M., D'Alessandro A., Materazzi A.L. Fire performance assessment of HPLWC hollow core slabs through full-scale furnace testing. *Fire Safety Journal*, 2014. Vol. 69. Pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.07.004.
5. Gravit M.V., Nedviga E.S., Vinogradova N.A., Teplova Zh.S. Ognestoykost' sborno-monolitnykh chas-torebristnykh plit po balkam so stal'nyim profilem [Fireproof of prefabricated monolithic multiribbed plate with rolled steel beam]. *Construction of unique buildings and structures*, 2016. No. 12(51). Pp. 73–83. (rus). DOI: 10.18720/CUBS.51.6.
6. Polevoda I.I., Zaynudinova N.V., Chaychits N.I. Rezul'taty ispytaniya na ognestoykost' zhelezobetonnnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom [The results of the fire test concrete slabs with unbonded reinforcement of the fire resistance]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, – 2016. No. 1 (23). Pp. 37–44. (rus)
7. Hertz K.D., Sørensen L.S., Giuliani L. Fire resistance of extruded hollow-core slabs. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2017. Vol. 8, No. 3. Pp. 324–336. DOI: 10.1108/JSFE-07-2016-0009.

8. Nedviga E., Beresneva N., Gravit M., Blagodatskaya A. Fire Resistance of Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slabs of “Marko” Technology. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 692. Springer, Cham, 2018. Pp. 739–749. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_78.
9. Li B., Lin Y.Q., Zhang H.L., Ma M.J. Fire behavior of the assembled monolithic hollow-ribbed slabs. *Advances in Civil Engineering*, 2019. Vol. 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2019/8921502.
10. Zhovna V.V., Shtykh A.A., Kudryashov V.A., Mordich A.I., Belevich V.N. Eksperimental'nye ispytaniya zhelezobetonnykh sborno-monolitnykh ploskikh perekrytiy, obrazovannykh mnogopustotnymi plitami dlya opredeleniya fakticheskikh predelov ognestoykosti konstruktsey [Experimental tests of reinforced concrete composite precast-cast-in-place floors formed with multiple hollow slabs for determining the actual fire resistance limits in structures]. *Construction science & engineering*, 2007. No. 4(13). Pp. 43–50.
11. Kudryashov V.A. Otsenka ognestoykosti sborno-monolitnogo perekrytiya so sbornymi mnogopustotnymi plitami [Fire resistance of semi-continuous hollow core slab elements in deck structures]. *Construction science & engineering*, 2008. No. 4(19). Pp. 37–42. (rus)
12. Abramyan C.G., Gnatyuk D.V. Sbornye i sborno-monolitnye karkasnye sistemy vysotnykh zdaniy s ploskimi plitami perekrytiy [Precast and cast-in-situ frame systems of high-rise buildings with flat slabs]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 2017. Vol. 9, No. 1, available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/83TVN117.pdf> (accessed: October 6, 2019). (rus)
13. Antonov A.A., Molodtsov M., Molodtsova V. Framing Systems in Residential Construction. *Procedia Engineering*, 2016. No. 150. Pp. 2138–2145. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.254.
14. Shubin A.A. Formula industrializatsii stroitel'stva: vysokaya skorost' + nizkaya sebestoimost' = UDS [Formula of industrialized building is high speed + lowest cost = UHS (Universal Housebuilding System)]. *Concrete Technologies*, 2013. No. 9. Pp. 32–35. (rus)
15. Gorodetskiy D.A., Barabash M.S., Vodop'yanov R.Yu., Titok V.P., Artamonova A.E. *Programmnyy kompleks LIRA-SAPR* [LIRA-SAPR software package]: tutorial. Kiev, Moscow: Elektronnoe izdanie, 2013. 376 p. (rus)
16. Davidyuk A.A., Artem'ev E.A., Shokot S.V. Podbor armirovaniya v plitakh perekrytiya v programmnykh kompleksakh LIRA-SAPR, SCAD, LIRA 10 [Selection of reinforcement for floor slabs using software packages LIRA-SAPR, SCAD, LIRA-10]. *Industrial and Civil Engineering*, 2018. No. 10. Pp. 69–73. (rus)
17. Polevoda I.I., Nekhan' D.S. Rezul'taty naturnykh ognevykh ispytaniy tsentrigirovannykh zhelezobetonnykh kolonn kol'tseвого secheniya [Results of full-scale fire test of spun reinforced concrete columns of annular section]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 142–159. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
18. Nekhan' D.S., Kurachenko I.Yu., Olesiyuk N.M., Kreer L.A. Issledovaniya temperatury gazovoy sredy pri provedenii naturnykh ognevykh ispytaniy stroitel'nykh konstruktsey [Temperature studies of the gaseous medium during full-scale fire tests of building constructions]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 130–141. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
19. Kudryashov V.A. Raschetnaya otsenka ognestoykosti zhelezobetonnykh ploskikh sborno-monolitnykh perekrytiy [Estimation of fire resistance of reinforced concrete flat precast-monolithic floors]. *Vestnik Komandno-inzhener'nogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2009. No. 1 (9). Pp. 93–97. (rus)

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.49>

УДК 614.841

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО МОНОЛИТНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ В СОСТАВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ФРАГМЕНТА КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ

Кудряшов В.А., Жамойдик С.М., Кураченко И.Ю., Нгуен Т.К.

Цель. Разработать методики и провести силовые испытания при нагружении, натурные огневые испытания железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания, получить экспериментальные данные относительных деформаций и перемещений при силовых испытаниях, распределения температур в огневой камере, в сечениях конструкции, перемещений плиты в ходе огневого воздействия и оценить повреждения.

Методы. Силовые испытания железобетонного перекрытия с использованием инвентарных грузов, комплекса прогибомеров и измерителей деформаций; натурные огневые испытания железобетонного монолитного перекрытия под нагрузкой с использованием углеводородной пожарной нагрузки, комплекса термоэлектрических преобразователей и системы измерения перемещений.

Результаты. Разработана методика и проведены силовые испытания железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания под нагрузкой 675 кг/м². Прогиб перекрытия в пролете составил не более 1/1000 пролета. Относительные деформации сжатия бетона в максимальных значениях не превышали 0,36 %, относительные деформации растяжения бетона в максимальных значениях – 0,89 %, что свидетельствует об упругопластической работе конструкции. Разработана методика и проведены натурные огневые испытания монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания под нагрузкой 675 кг/м². С использованием 2405 л отработанного моторного масла и 1,8 м³ древесины создан тепловой режим пожара, близкий к стандартному. Температура на обогреваемой поверхности перекрытия достигала 1000 °С, при этом на необогреваемой стороне температура была не выше 40 °С, что привело к существенным деформациям перекрытия, суммарно между центром и консольными краями – около 300 мм, либо 1/30 от геометрической длины плиты. В результате испытаний на 69-й мин от начала объемного пожара произошло внезапное разрушение железобетонных центрифугированных колонн. После обрушения фрагмента в перекрытии зафиксировано два линейных пластических шарнира в пролете на расстоянии 1,5 м от каждой опоры в месте обрыва дополнительной арматуры.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть применены для оценки огнестойкости железобетонных монолитных перекрытий, при разработке расчетных методик и в моделировании железобетонных монолитных конструкций при силовых воздействиях и пожаре, а также разработке методик натурных огневых испытаний железобетонных конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, предел огнестойкости, железобетонное монолитное перекрытие, эксперимент, каркасное здание, методика испытаний, силовые испытания, натурные огневые испытания, строительные конструкции, разрушение.

(Поступила в редакцию 28 января 2021 г.)

Введение

Обеспечение прочности и устойчивости строительных конструкций при любых видах воздействий является важной задачей при проектировании зданий. Одним из видов особой расчетной ситуации является пожар. Обеспечение несущей способности и устойчивости конструкций при пожаре характеризуется огнестойкостью (пределом огнестойкости). Пределы огнестойкости строительных конструкций могут быть определены расчетным методом, по результатам огневых испытаний либо их комбинацией. Расчетные методы широко применяются для строительных конструкций, огнестойкость которых изучена экспериментально и достоверно известны их схемы разрушения при пожаре, в том числе прочностные и теплофизические характеристики материалов в диапазоне температур пожара. В иных случаях проводят огневые испытания.

Огневые испытания, как правило, проводят на специальных огневых печах. Параметры испытуемых образцов при этом ограничены геометрическими размерами печей, что иногда затрудняет приложение нагрузок для создания в расчетных сечениях напряжений, соответствующих реальным условиям эксплуатации¹. Для железобетонных монолитных перекрытий, работающих как статически неопределимые системы, воссоздание напряжений, близких к реальным, возможно только при натурных огневых испытаниях, когда полностью либо частично воспроизводятся рамный каркас здания и соответствующие нагрузки.

Данная статья является продолжением статьи [1], в которой подробно описаны проектирование и возведение, а также вопросы воссоздания реальных усилий и деформаций, возникающих в многократно статически неопределимых каркасах зданий. В настоящей статье приведены методика и результаты силовых испытаний при нагружении, а также методика и результаты натурных огневых испытаний экспериментального фрагмента каркасного здания.

Основная часть

Цель и задачи исследований. Цель исследований заключается в разработке и получении экспериментальных данных относительных деформаций и перемещений при силовых испытаниях, распределения температур в огневой камере, в сечениях конструкции, перемещений плиты в ходе огневого воздействия, оценке повреждений. Для достижения цели решены следующие задачи:

разработана методика и проведены силовые испытания экспериментального фрагмента нагружением;

разработана методика и проведены натурные огневые испытания в условиях совместного температурно-силового воздействия.

Как представлено в статье [1], для проведения испытаний был рассчитан, спроектирован и возведен фрагмент каркасного здания с железобетонным монолитным перекрытием размерами в плане 3,0×9,0 м, толщиной 200 мм, с пролетом между опорами 6,0 м, с консольными свесами 1,5 м.

В качестве поддерживающих опор применяли две центрифугированные колонны, изготовленные на ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» из бетона класса по прочности на сжатие $C^{32}/_{40}$, наружным диаметром 560 мм с толщиной стенки 55 мм. Колонны были армированы пространственным каркасом из 7 рабочих стержней класса S500 диаметром 12 мм и поперечной спиральной проволоки В-1 диаметром 4 мм. Толщина защитного слоя бетона составляла 20 мм. Подробное описание колонн представлено в работе [2].

Огневая камера создавалась путем возведения по периметру фрагмента самонесущих стен до уровня перекрытия из газосиликатных блоков толщиной 200 мм. Для поддержания температурного режима при проведении огневых испытаний и удаления продуктов горения в середине торцевых стен на высоте 1000 мм от уровня фундамента устраивали по оконному проему размером 800×1250 мм; на расстоянии 1250 мм от торцевых стен в продольных стенах с двух сторон на высоте 1750 мм от уровня фундамента – проемы размером 500×500 мм; в середине одной из двух продольных стен на уровне фундамента – дверной проем размером 1000×2000 мм [1; 3]. Общий вид испытательного фрагмента каркасного здания представлен на рисунке 1. Стороны экспериментального фрагмента были условно обозначены как передний и задний фасад, левая и правая стороны со стороны переднего фасада, при этом дверной проем был выполнен со стороны заднего фасада.

Методика и результаты силовых испытаний. Методика силовых испытаний была тесно увязана с огневыми испытаниями и была нацелена на подробное изучение перемещений и относительных деформаций монолитной железобетонной плиты в ходе загрузки до уровня нагрузок, принятых для огневых испытаний. Указанные исследования обусловлены прежде всего тем, что при высоких температурах измерение деформаций железобетонных конструкций является сложно выполнимой задачей.

¹ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Взамен СТ СЭВ 1000-78, СТ СЭВ 5062-85; введ. 01.10.98. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 7 с.



а – передний фасад

б – задний фасад

Рисунок 1. – Общий вид испытательного фрагмента каркасного здания

В качестве основы для методики силовых испытаний была принята методика испытаний нагружением железобетонных конструкций заводского изготовления². Методика силовых испытаний включала:

разработку схемы измерения перемещений и относительных деформаций;

нагружение фрагмента железобетонного монолитного перекрытия инвентарными грузами с фиксацией показаний на каждом этапе нагружения.

Ввиду ограниченного количества измерительного оборудования точки установки приборов были предусмотрены:

в середине пролета плиты – прогибомер 6-ПАО (ТУ 4273-095-59489947-2007), измерители деформаций ИЧ-10³ (по 2 в продольном и поперечном направлении в центре плиты снизу и сверху, а также 4 измерителя в середине продольной торцевой поверхности);

в приопорной зоне – по одному ИЧ-10 сверху и снизу в продольном направлении на расстоянии 100 мм от колонны;

на колоннах – 6 измерителей ИЧ-10 на уровне 2/3 высоты колонны (4 измерителя на одной колонне соответственно продольному и поперечному направлению плиты, 2 измерителя на другой колонне в продольном направлении перекрытия).

Индикаторы часового типа ИЧ-10 устанавливали на консольных кронштейнах с упором в неподвижный штифт, закрепленный также на кронштейне таким образом, чтобы штифт располагался параллельно плоскости конструкции на высоте кронштейна. Расстояние между кронштейнами по оси штифта применяли в качестве базы измерения. Схема установки измерителей И1, И2, И10 снизу перекрытия в продольном и поперечном направлениях, а также И3–И5 сверху перекрытия представлена на рисунке 2.

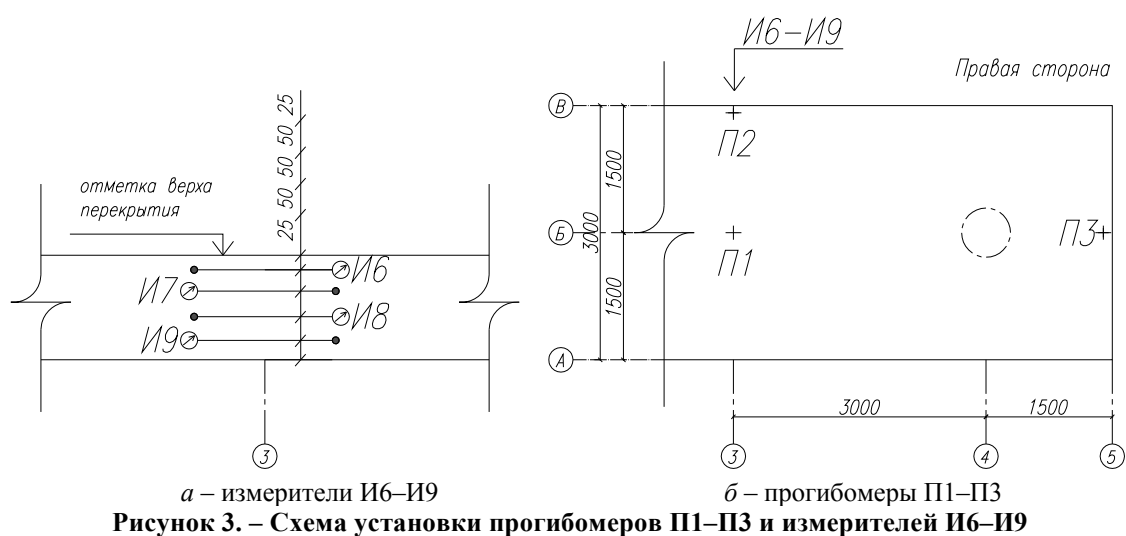
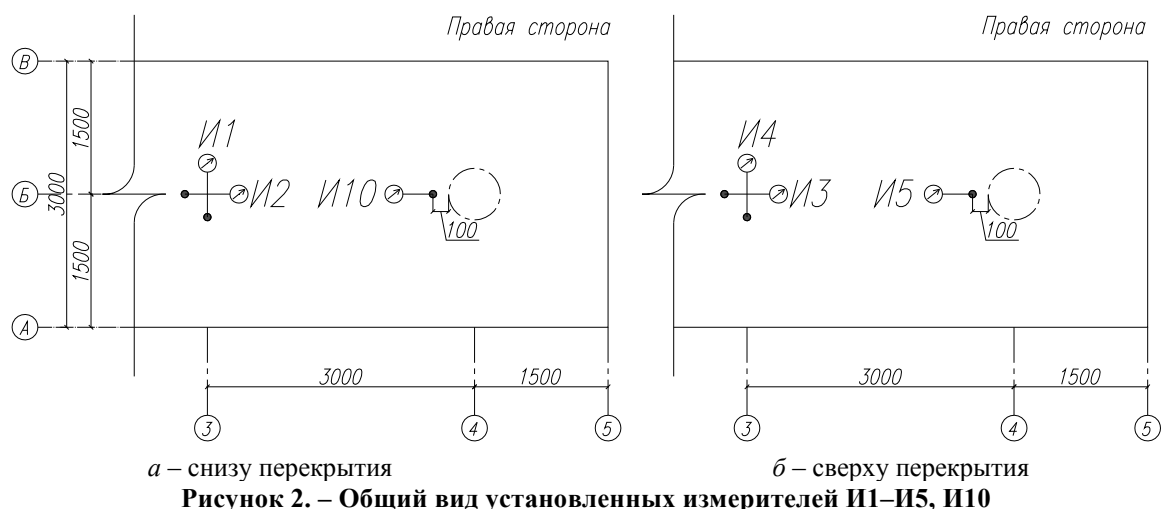
Прогибомеры 6-ПАО крепили с помощью струбцин к неподвижным опорам, размещаемым снизу перекрытия в местах контролируемых прогибов, а на нижней поверхности перекрытия устанавливали штифты перпендикулярно ведущему блоку прогибомеров. Измеряемое перемещение с помощью струны передавалось ведущему блоку прогибомера. Натяжение струны обеспечивали подвешиванием грузов массой 1 кг. Схема установки прогибомеров П1–П3, а также измерителей И6–9 в середине продольной торцевой поверхности перекрытия представлена на рисунке 3.

В качестве нагрузки на экспериментальный фрагмент использовали 50 блоков типа ФБС 9.4.6⁴ номинальной массой 480 кг каждый. Для распределения нагрузки по площади перекрытия под грузы использовали деревянные бруски 50×50×400 мм.

² Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости: ГОСТ 8829-2018. – Взамен ГОСТ 8829-94; введ. 29.11.18. – Минск: БелГИСС, 2019. – 16 с.

³ Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия: ГОСТ 577-68. – Взамен ГОСТ 577-60; введ. 01.07.68. – Минск: БелГИСС, 2013. – 12 с.

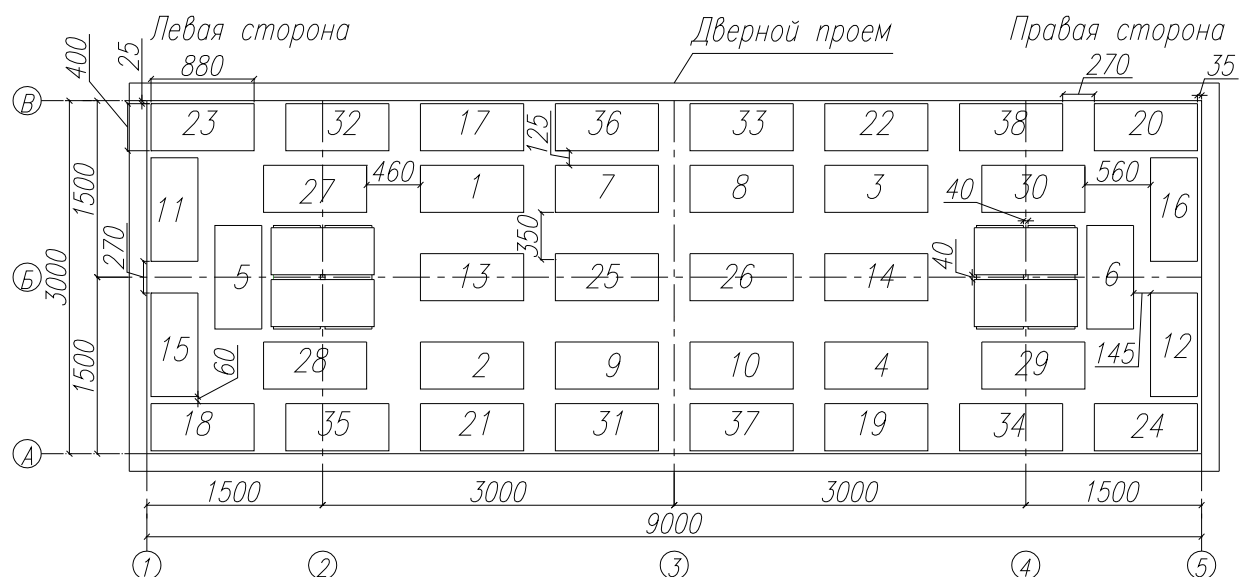
⁴ Блоки бетонные для стен подвалов. Технические условия: ГОСТ 13579-2018. – Взамен ГОСТ 13579-78; введ. 30.05.18. – Минск: БелГИСС, 2018. – 15 с.



Нагружение проводили поэтапно ступенями (долями по 4, 6 блоков) в направлении от опор (консолей) к середине, чтобы усилия в предполагаемом участке разрушения плиты прирастали равными долями. После приложения каждой доли нагрузки фрагмент выдерживали в течение 10 мин до следующего этапа нагружения. В течение указанного времени осуществляли съем показаний с прогибомеров и измерителей деформаций. После выдержки под нагрузкой проводили осмотр поверхности плиты и колонн на наличие трещин. После окончания нагружения фрагмент выдерживали 30 мин, после чего вновь фиксировали показания приборов.

С целью соблюдения требований безопасности и обеспечения неизменного положения фундаментных блоков при возможных деформациях плиты применяли канатный трос диаметром 6,0 мм, которым блоки скрепляли между собой. Плотность распределения нагрузки на перекрытие в среднем составляла 675 кг/м^2 , сосредоточенная нагрузка над колоннами – 2880 кг (что соответствует расчетным значениям нагрузки, принятым при моделировании [1]). Схема нагружения фрагмента показана на рисунке 4.

В ходе проведения силовых испытаний смещение арматуры относительно бетона на торцах плиты, видимые трещины, а также раздробление бетона сжатой зоны зафиксированы не были. Значения относительных деформаций в сечениях плиты, полученные по показаниям измерителей И1–И10 на этапах нагружения, представлены на рисунках 5 и 6.



Цифрами условно обозначен порядок установки грузов на перекрытие: этап 1 – нагружение колонн; этап 2 – грузы 1–6; этап 3 – грузы 7–10; этап 4 – грузы 11–16; этап 5 – грузы 17–20; этап 6 – грузы 21–24; этап 7 – грузы 25–30; этап 8 – грузы 31–34; этап 9 – грузы 35–38.

Рисунок 4. – Схема нагружения железобетонного монолитного перекрытия экспериментального фрагмента здания



Рисунок 5. – Относительные деформации бетона верхней и нижней плоскости

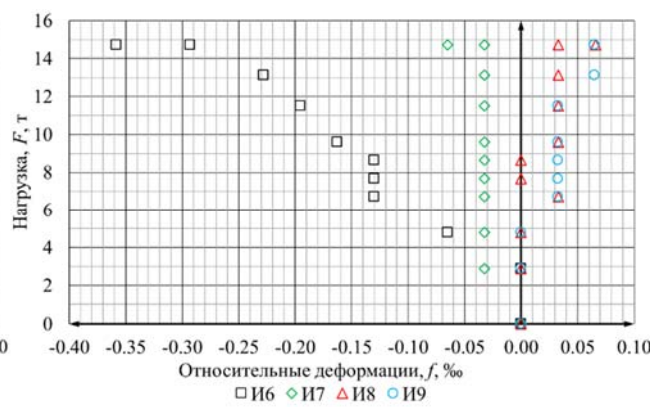


Рисунок 6. – Относительные деформации бетона в середине пролета на торце плиты

Относительные деформации сжатия бетона в максимальных значениях не превышали 0,36 % (в середине пролета на торце плиты, датчик И6), что свидетельствует об упругой работе бетона (на уровне 18...20 % от деформаций ε_{cl} согласно СП 5.03.01⁵). Относительные деформации растяжения бетона в максимальных значениях не превышали 0,89 % (в середине пролета в поперечном направлении снизу плиты, датчик И1), что свидетельствует о работе бетона с трещинами (деформации трещинообразования ε_{cr} согласно СП 5.03.01 составляют 0,053...0,067 %) и упругой работе арматуры (на уровне 40 % от деформаций ε_{sy} согласно СП 5.03.01).

Данные измерений перемещений отдельных точек перекрытия на каждом этапе нагружения представлены на рисунке 7.

После нагружения плиты максимальные значения перемещений составили: в середине пролета в центре плиты – 3,6 мм; в середине пролета у продольной торцевой грани – 3,7 мм; в свободной консоли – 2,5 мм. Полученные результаты перемещений и относительных деформаций не учитывают собственный вес плиты, но в целом свидетельствуют об упругопластической работе железобетона для примененных нагрузок.

⁵ Бетонные и железобетонные конструкции: СП 5.03.01-2020. – Взамен СНБ 5.03.01-02, СНиП 2.03.01-84; введ. 16.11.20. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 245 с.

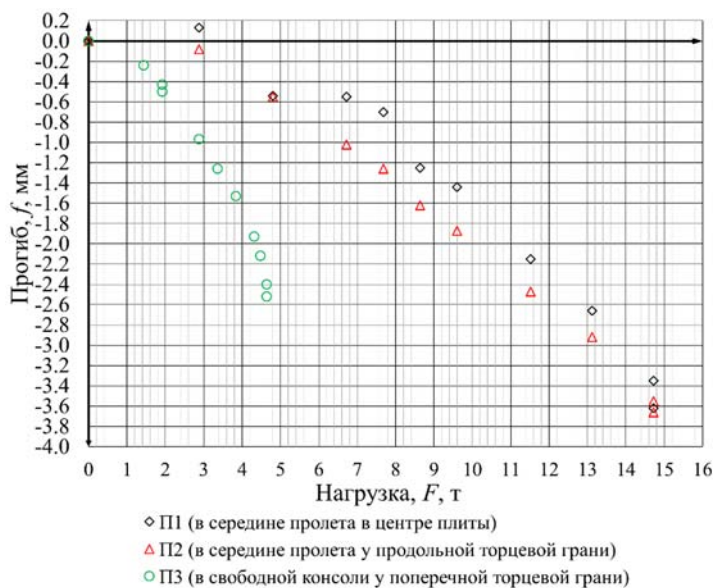


Рисунок 7. – Экспериментальные значения перемещений отдельных точек перекрытия в ходе силовых испытаний

нове опыта аналогичных исследований на территории Республики Беларусь [4–8]. Методика огневых испытаний предусматривала:

- разработку схемы размещения термоэлектрических преобразователей (далее – ТП) в объеме камеры и в сечениях железобетонных конструкций;

- расчет необходимого количества пожарной нагрузки для обеспечения огневого режима, соответствующего стандартному температурному режиму пожара (в настоящей статье не представлен, см. работу [3]);

- разработку схемы измерения перемещений отдельных точек железобетонного монолитного перекрытия;

- разработку схемы подключения и огнезащиты измерительных приборов.

Исследование поведения экспериментальной конструкции при пожаре требует оценки температурно-временных зависимостей у обогреваемой и необогреваемой граней плиты, а также на рабочей арматуре, для качественной формулировки граничных условий теплообмена. Схема расстановки ТП в объеме огневой камеры предусматривала измерение температуры внутри фрагмента в 27 точках, по 9 ТП на отметках 550 мм, 1375 мм и 2200 мм от уровня фундамента. Более подробно методика измерений приведена в статье [3].

Для измерения температуры на рабочей арматуре (нижней и верхней) как в середине пролета, так и в приопорных зонах со стороны пролета и консольных свесов вязальной проволокой к арматурным изделиям крепили ТП типа ТХА(К)-1199/51 2/500/3/3.5 (-40...+1000 °С) и КТНН 02.01-050-к1-И-Т740-3-100/11000 (-40...+800 °С) перед бетонированием перекрытия [1]. ТП крепили параллельно оси арматурных изделий. С целью оценки температуры обогреваемой и необогреваемой поверхности ТП крепили таким образом, чтобы горячий спай находился параллельно плоскости плиты. Схема расстановки ТП на арматуре, а также на обогреваемой и необогреваемой поверхности показана на рисунке 8.

Теоретическое перемещение центра плиты по данным моделирования [1] в середине пролета от собственного веса конструкции с коэффициентом надежности по нагрузке, равным 1,35, составило 4,75 мм, или суммарно с экспериментальными перемещениями от нагрузки – 8,35 мм. Таким образом, полученные значения перемещений позволяют предположить о близком соответствии экспериментальной конструкции перекрытия расчетной модели, прогиб которой составил 9,64 мм (разница составила 13,4 %) [1].

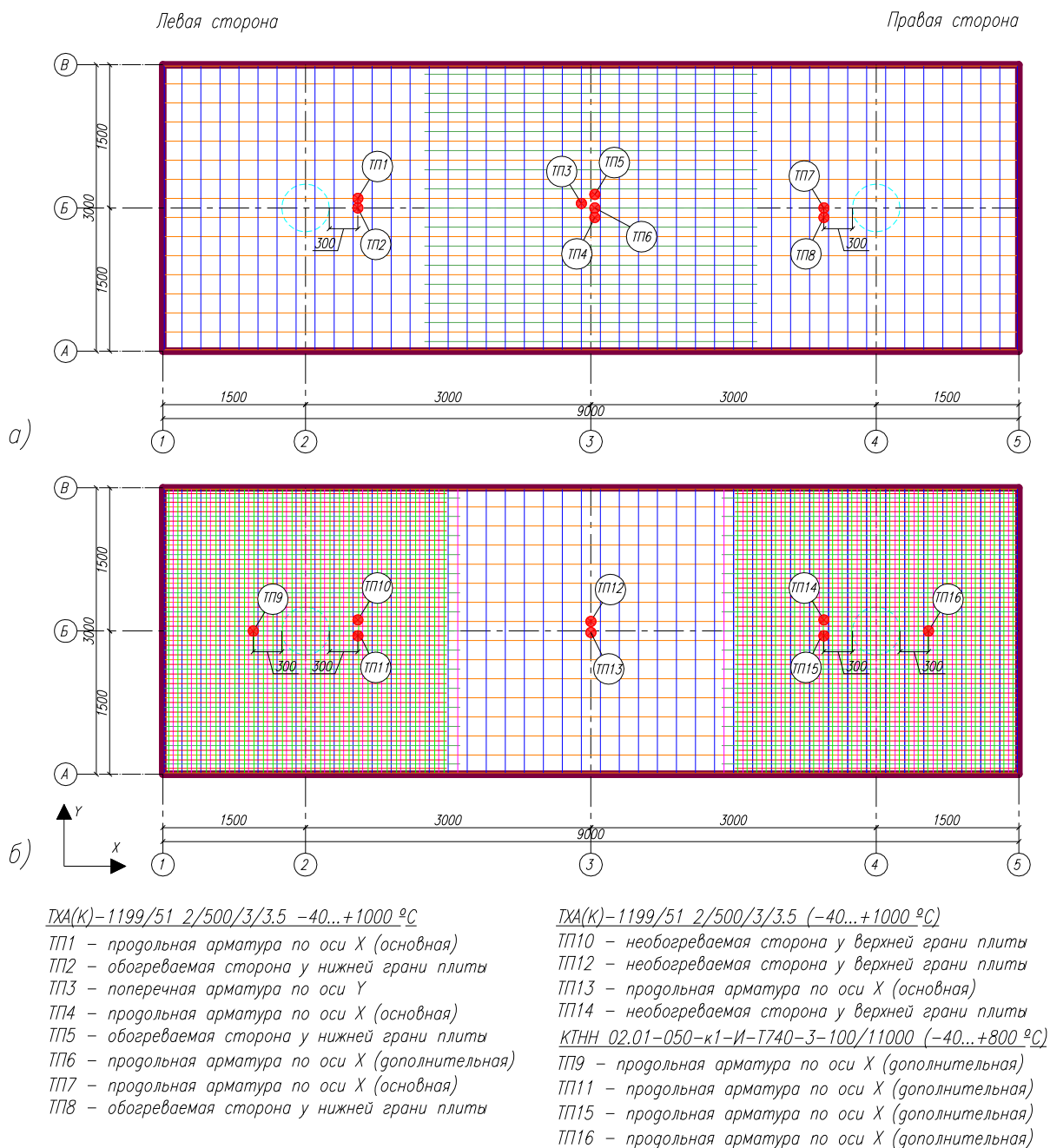
Методика огневых испытаний. Методика проведения огневых испытаний была разработана на основании стандартизованных методик^{6, 7}, опыта Российской Федерации в этой области^{8, 9}, а также на ос-

⁶ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94 – Взамен СТ СЭВ 1000-78; введ. 01.10.98. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 12 с.

⁷ См. сноску 1.

⁸ Здания и фрагменты зданий. Метод натурных огневых испытаний. Общие требования [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 53309-2009. – Введ. 01.05.09. – М.: Стандартинформ, 2009. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200071873>. – Дата доступа: 13.11.2019.

⁹ Испытания на огнестойкость. Руководящие указания по планированию и проведению крупномасштабных испытаний и моделированию без использования печи [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 55994-2014/ISO/TR 15658:2009. – Введ. 01.01.15. – М.: Стандартинформ, 2014. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200110470>. – Дата доступа: 13.11.2019.



а) – арматура у нижней грани; б) – арматура у верхней грани
Рисунок 8. – Схема размещения термоэлектрических преобразователей для железобетонного монолитного перекрытия экспериментального фрагмента

В процессе огневых испытаний преобразование электрических сигналов от ТП осуществляли с применением универсальных измерителей-регуляторов ТРМ138-Р (ТУ 4217-015-46526536-2008) с передачей данных на персональные компьютеры посредством преобразователя интерфейсов АС4-М (ТУ-4218-003-46526536-2006). Также для оценки полной картины распределения температур в реальном времени бесконтактным методом применяли тепловизионную камеру FLIR T420bx.

Схема измерения перемещений отдельных точек перекрытия была обусловлена отсутствием возможности использовать измерители деформаций в условиях высоких температур. Поэтому предпочтение было отдано способам удаленного измерения перемещений посредством тахеометра и реперных точек над поверхностью плиты, а также (для дублирования) с использованием прогибомеров 6-ПАО с переносом данных перемещений за пределы фрагмента посредством стальной проволоки, пропущенной через систему блоков в импровизированной ферме (опертой шарнирно на ряд нагруженных блоков над колоннами).

В качестве реперных точек посредством анкеров жестко крепили к плите консольные стальные стойки квадратного сечения $25 \times 25 \times 1,5$ мм с шарнирно прикрепленными на высоте 1,0 м металлическими линейками Л1–Л4 с пределом измерений 500 мм. Для обеспечения вертикального положения линеек Л1–Л4 в ходе огневых испытаний снизу подвешивали грузы. Контроль величины перемещений контрольных точек на линейках при огневых испытаниях достигался с применением электронного тахеометра South NTS-362R на расстоянии 16,0 м от переднего фасада на уровне расположения линеек Л1–Л4.

Как отмечалось выше, для альтернативного способа измерения прогибов плиты был принят способ, основанный на применении прогибомеров 6-ПАО. Для этого была изготовлена треугольная ферма из алюминиевых профилей прямоугольного сечения $30 \times 15 \times 1,5$ мм, пролетом 6 м и высотой 1,11 м. Для исключения смещения фермы под воздействием размещенной на колоннах нагрузки одну из стоек с помощью металлических пластин и уголков крепили к этим грузам, а другую оставляли свободно опертой.

Общий вид стоек с прикрепленными линейками, а также изготовленная и размещенная на грузах ферма показаны на рисунке 9.



а – стойки с линейками



б – ферма, установленная на испытуемом фрагменте

Рисунок 9. – Приспособления для измерения перемещений в ходе огневых испытаний

Принцип измерения с помощью прогибомеров основывался на определении величины вертикального перемещения точки плиты во время проведения огневых испытаний. Измеряемое перемещение передавалось ведущему блоку прогибомера П1 с помощью натянутой струны, прикрепленной к средней трети плиты в середине пролета через анкер с ушком в форме кольца и перекинутой через блок-ролики, установленные в середине пролета верхнего пояса и в районе одной из опор фермы. Натяжение струны осуществлялось грузом, подвешенным к ее свободному концу. В качестве струны применяли трос для растяжки DIN3055 диаметром 1,5 мм с рабочей нагрузкой 0,25 кН, изготовленный из оцинкованной стали методом обвива высокопрочной проволоки вокруг сердечника.

Для измерения горизонтальных и вертикальных перемещений плиты на безопасных расстояниях устанавливали неподвижные опоры, к которым крепили прогибомеры П2 и П3. В правом торце плиты со стороны переднего фасада в углу у верхней грани устанавливали анкер с ушком в форме кольца. К анкеру крепили два троса DIN3055, которые под углом 90° натягивали к ведущим блокам прогибомеров П2 и П3. Схема установки тахеометра, прогибомеров, металлической фермы и стоек с линейками, предназначенных для измерения прогибов и горизонтальных перемещений плиты при проведении натурных огневых испытаний, показана на рисунке 10 (условно показана только статическая нагрузка на колонны).

Для предотвращения обрушения железобетонной плиты, а также возможности ее изучения после проведения огневых испытаний и после снятия статической нагрузки, с учетом ожидаемого прогиба в объеме фрагмента здания, были возведены 4 страховочные опоры из одинарного керамического кирпича размером $380 \times 380 \times 2400$ мм.

С целью защиты кабелей ТП в местах возможного температурного воздействия устанавливали металлический экран, а кабели в этих местах обматывали минеральной ватой.

В процессе проведения огневых испытаний непрерывно вели фото- и видеосъемку. Для измерения длительности испытаний применяли электронный секундомер «Интеграл С-01».

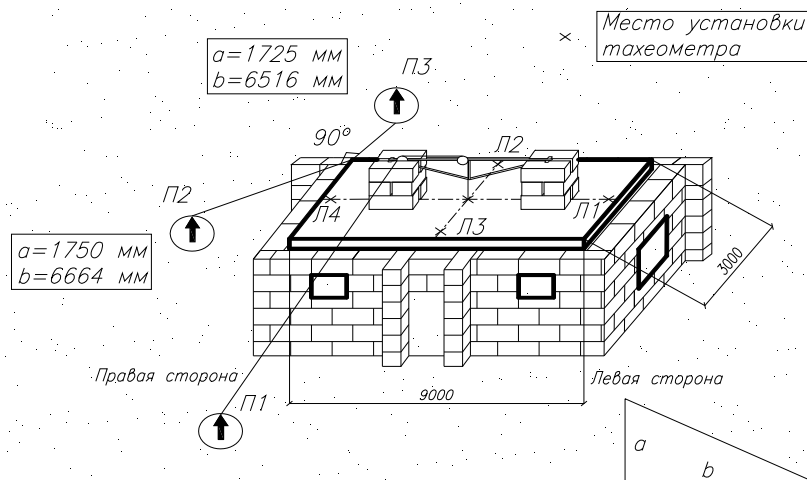


Рисунок 10. – Схема установки тахеометра, прогибомеров, металлической фермы и стоек с линейками на плите перед огневыми испытаниями

Результаты огневых испытаний. Огневые испытания проводили 04.01.2019. Температура окружающей среды перед проведением испытаний составляла 2 °С, влажность воздуха – 87 %. Согласно гидрометеорологическим данным скорость ветра могла достигать 7 м/с (фрагмент был окружен лесопосадками на расстоянии 50...100 м), направление ветра было изменчивым, осадки отсутствовали [3].

Как было указано выше, горючая нагрузка представляла собой 2,1 т отработанного масла и 1,8 м³ древесины влажностью 10,2 %. Розжиг горючей нагрузки осуществляли одновременно тремя операторами с использованием факела с ветошью, смоченной ЛВЖ. От момента розжига до перехода в объемную стадию прошло 10 мин. В дальнейшем в качестве точки отсчета огневого воздействия принимали именно переход пожара в объемную стадию, которая характеризовалась температурой вспышки паров отработанного масла, равной 140 °С. Результаты измерения температуры внутри огневой камеры в сопоставлении со стандартным температурным режимом пожара представлены на рисунке 11.

В целом изменение среднеобъемной температуры внутри экспериментального фрагмента было близко к стандартному огневому режиму, при этом до 10 мин пожара скорость нарастания температуры была ниже ввиду естественного режима сгорания пожарной нагрузки. Вплоть до 30-й мин среднеобъемная температура пожара была в допустимых пределах, однако с 30 по 45 мин рост температуры пожара начал ускоряться и выходить за пределы допустимых отклонений стандартного температурного режима, что вынудило ввести однократное пенное тушение вблизи дверного проема, что в течение 5 последующих минут позволило снизить температуру ближе к верхнему допустимому пределу для стандартной температурной кривой вплоть до 65-й мин огневого испытания. Однако вынужденное тушение привело к потере устойчивости страховочных опор из кирпича ввиду их резкого неравномерного охлаждения. В последние 3 мин эксперимента среднеобъемная температура была несколько выше допустимых отклонений. Результаты измерения температуры на обогреваемой, необогреваемой поверхности и рабочей арматуре железобетонного монолитного перекрытия представлены на рисунках 12 и 13.

Из рисунка 12 следует, что обогреваемая сторона перекрытия нагревалась близко к среднеобъемной температуре и составляла 0,7...0,9 долей от нее. Более плавный нагрев зафиксирован на нижней продольной арматуре, при этом условный критерий 500 °С был превышен в среднем на 25 мин. Следует отметить, что нагрев арматуры сопровождался процессом хрупкого взрывообразного разрушения защитного слоя бетона, который прекратился лишь к 22-й мин объемного пожара. На необогреваемой стороне, в том числе на верхней арматуре, температура не превышала 40 °С в ходе всей длительности огневого воздействия.

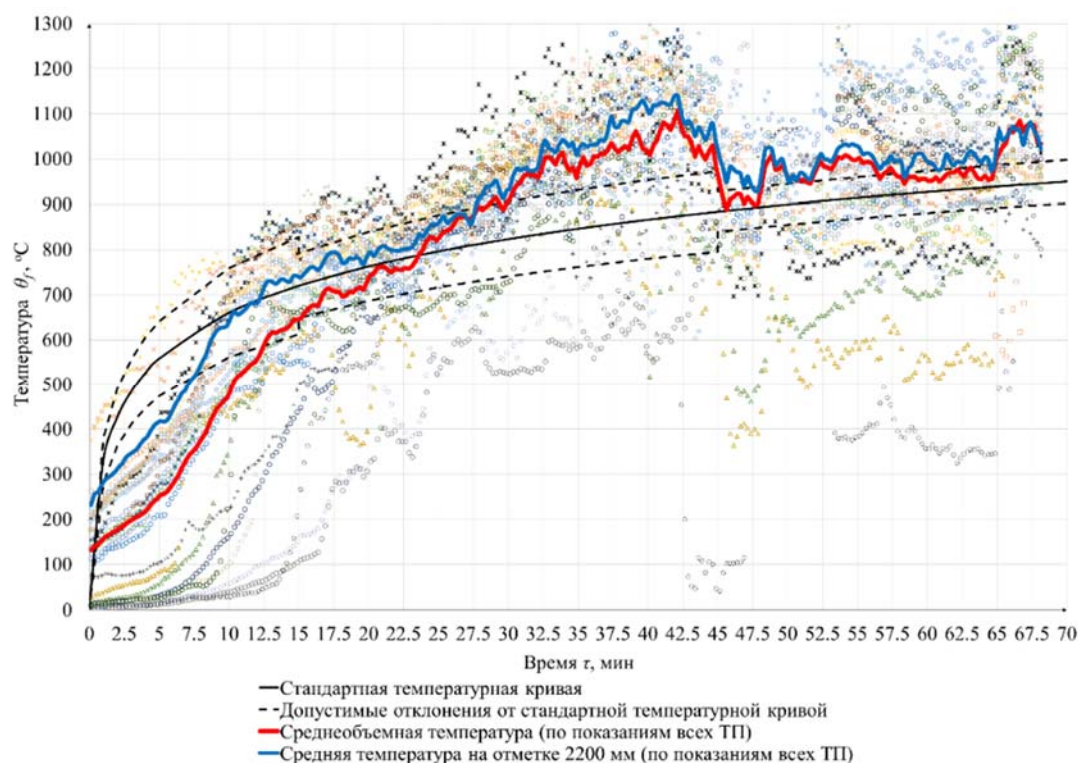


Рисунок 11. – Изменение температуры газовой среды внутри экспериментального фрагмента в ходе огневых испытаний

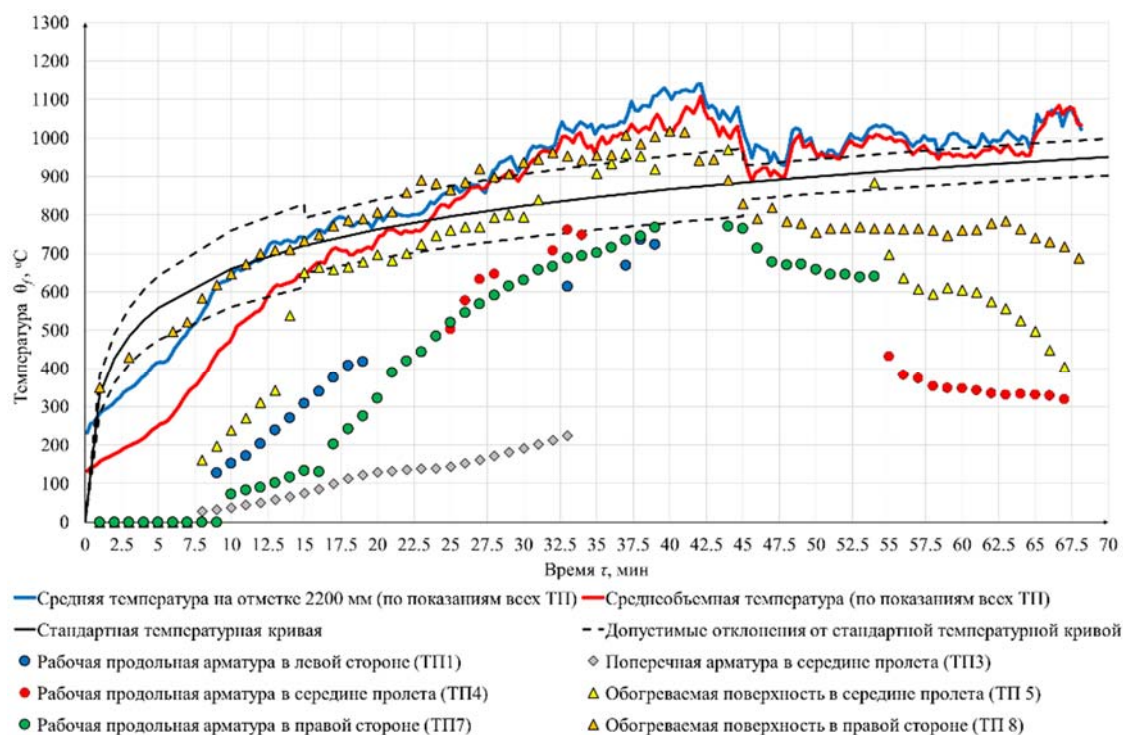


Рисунок 12. – Изменение температуры нижнего армирования и обогреваемой поверхности железобетонного перекрытия в сравнении со среднеобъемными температурами внутри экспериментального фрагмента

В ходе огневого воздействия для части ТП были зафиксированы электромагнитные помехи, часть данных была отнесена к грубым ошибкам измерения. Кроме того, часть ТП (ТП2 (обогреваемая поверхность с левой стороны), ТП6 (нижняя продольная арматура) и ТП10 (необогреваемая поверхность с левой стороны)) были признаны неработоспособными ввиду технических причин.

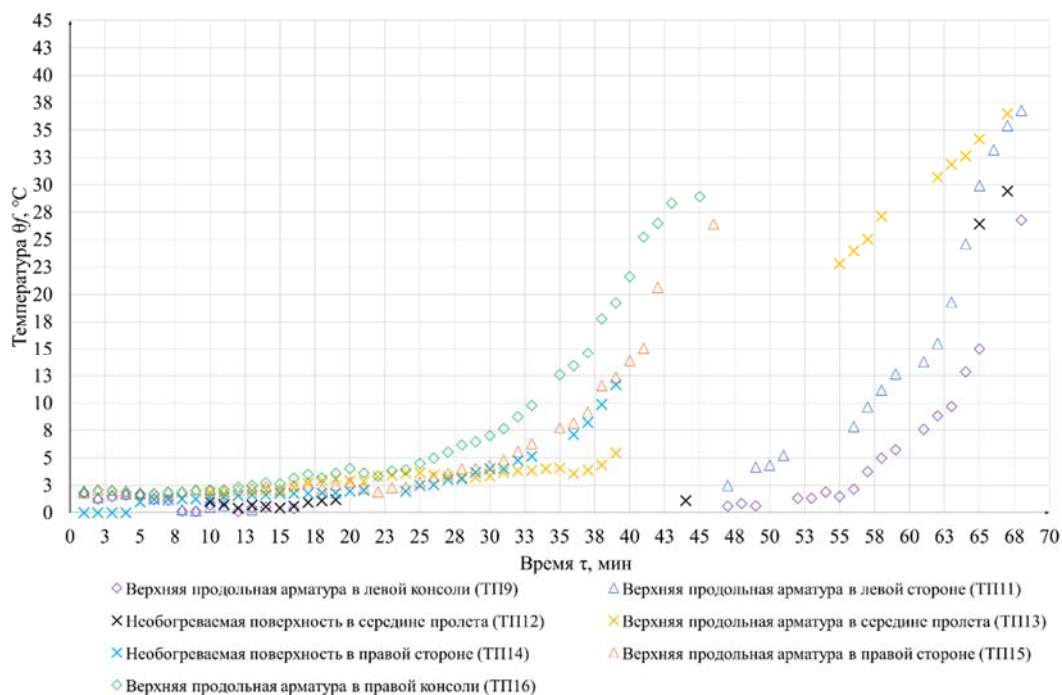


Рисунок 13. – Изменение температуры верхнего армирования и необогреваемой поверхности железобетонного перекрытия экспериментального фрагмента

Как отмечалось выше, в целях объективной оценки полученных от ТП данных применяли тепловизионную камеру FLIR T420bx. Картина распределения температур в отдельные моменты испытаний представлена на рисунках 14 и 15.

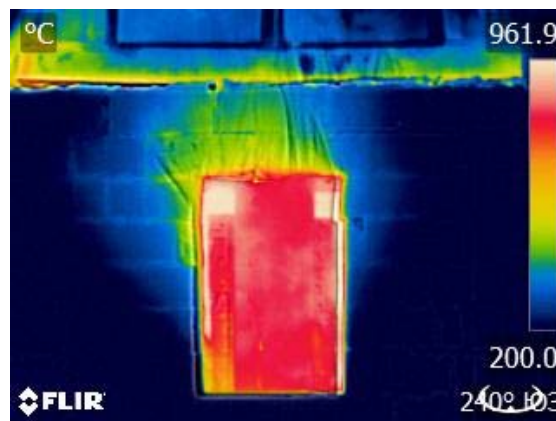


Рисунок 14. – Термограмма для 44-й мин огневого испытания (вид с левого фасада)

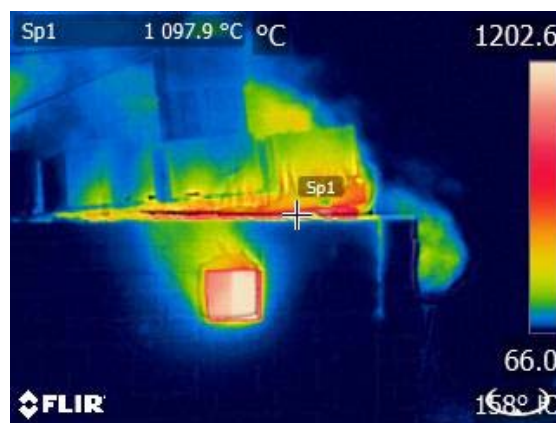


Рисунок 15. – Термограмма для 64-й мин огневого испытания (вид правой части переднего фасада)

Изменение вертикальных перемещений плиты, как было отмечено выше, осуществлялось оптическим и дистанционным методом посредством прогибомеров 6-ПАО. При этом ввиду плотного задымления результаты перемещений оптическим методом наиболее достоверно получены только для середины пролета железобетонной плиты и составили -90 мм к моменту разрушения колонн (рис. 16). При этом консольные участки железобетонного перекрытия перемещались в положительном направлении (вверх) с более высокой скоростью и составили +190 мм к 59-й мин пожара.

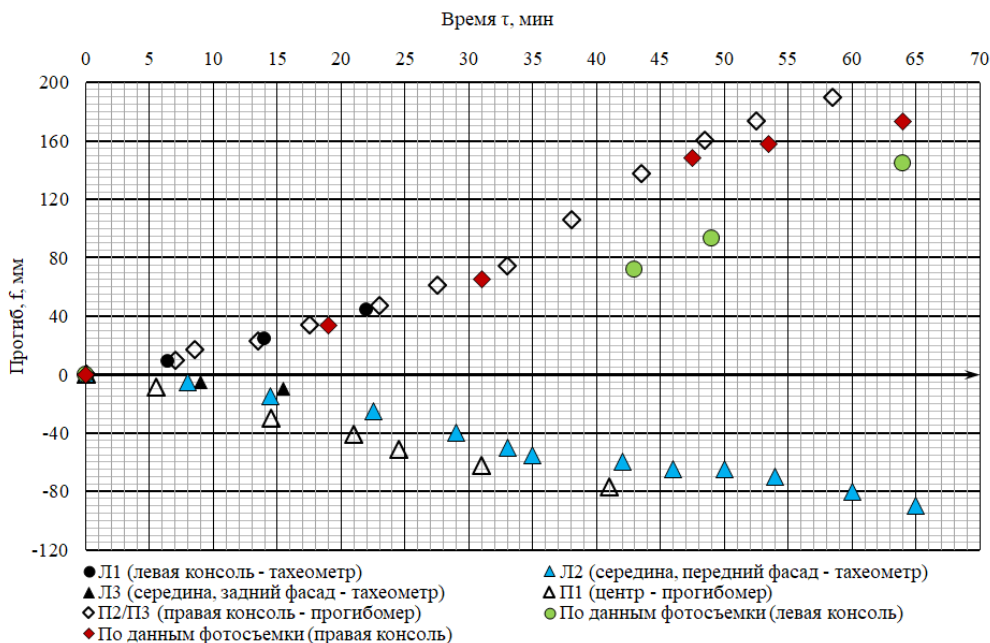


Рисунок 16. – Экспериментальные значения перемещений плиты при огневых испытаниях

В целом плоскость перекрытия была изогнута наподобие свободно опертой плиты по 4 углам, при этом отмечается более сильный поворот правой части консоли по сравнению с левой (рис. 17).



Рисунок 17. – Общий вид испытательного фрагмента перед разрушением колонн

На 69-й мин огневого воздействия от начала объемного пожара произошло внезапное разрушение центрифугированных колонн и разобщение арматуры колонн с бетоном, что привело к падению перекрытия практически на уровень +400 мм от уровня земли (высота падения составила 2,35 м). В ходе падения были разрушены ограждающие конструкции. Момент разрушения колонн и падения плиты показан на рисунке 18. После обрушения конструкций произвели пенное пожаротушение и в течение последующих 5 мин полностью остановили процессы горения.

Общий вид разрушенного фрагмента здания представлен на рисунке 19.

После исследования остывшего монолитного перекрытия было обнаружено 2 линейных пластических шарнира внутри пролета, каждый на расстоянии 1,5 м от опоры (по линии обрыва дополнительного армирования) (рис. 20). Момент образования пластических шарниров достоверно не известен и является предметом дальнейших исследований.



Рисунок 18. – Момент разрушения колонн и падения перекрытия



Рисунок 19. – Общий вид разрушенного фрагмента здания



а – с левой стороны



б – с левой стороны

Рисунок 20. – Линейные пластические шарниры железобетонного монолитного перекрытия

По результатам изучения повреждений плиты были зафиксированы значительные повреждения целостности железобетонного перекрытия в виде сколов бетона на глубину, превышающую толщину защитного слоя бетона, оголение и выход из плоскости рабочей арматуры, вызванные процессами хрупкого взрывообразного разрушения. При этом отмечено значительное оголение рабочей арматуры между пластическими шарнирами внутри пролета, в том числе оголение приопорного поперечного армирования [1] (рис. 21).



а – рабочая арматура
между пластическими шарнирами



б – арматурные изделия,
установленные на приопорных участках

Рисунок 21. – Вид нижней поверхности перекрытия после остывания

В местах консольных вылетов образовались локальные сколы бетона на глубину 10–15 мм площадью 1,5–2,5 м². Цвет на обогреваемой поверхности ввиду высокотемпературного воздействия изменился на темно-желтый. При этом сажа и копоть не наблюдались.

Предел огнестойкости экспериментального фрагмента, включающего железобетонное монолитное перекрытие, опертное на две железобетонные центрифугированные колонны, с распределенной нагрузкой 675 кг/м² и сосредоточенной нагрузкой над колоннами 2880 кг с учетом пересчета эквивалентной мощности стандартного пожара [1] составил REI 69 (либо REI 60 для стандартного ряда).

Заключение

1. Для спроектированного и возведенного фрагмента каркасного здания разработаны методики и проведены комплексные силовые и огневые испытания, позволившие установить деформированное состояние железобетонного монолитного перекрытия под нормативной нагрузкой, в том числе в условиях высокотемпературного огневого воздействия, близкого к стандартному огневому режиму.

2. Методика силовых испытаний предусматривала уточнение деформированного состояния монолитного железобетонного перекрытия толщиной 200 мм под нагрузкой 675 кг/м², соответствующей нормативному значению постоянных и временных длительно действующих нагрузок. Деформированное состояние определяли посредством 3 прогибометров 6-ПАО, установленных в середине пролета и на краю консольного вылета перекрытия, а также посредством измерителей деформаций часовых ИЧ-10, установленных в двух направлениях (продольном и поперечном) в нижней и верхней части пролетной и опорной части плиты, а также сбоку плиты в середине пролета.

3. Силовые испытания показали, что прогиб перекрытия в пролете составил не более 1/1000 пролета. Относительные деформации сжатия бетона в максимальных значениях не превышали 0,36 ‰ (в середине пролета на торце плиты, датчик И6), что свидетельствует об упругой работе бетона (на уровне 18...20 % от деформаций ε_{cl} согласно СП 5.03.01). Относительные деформации растяжения бетона в максимальных значениях не превышали 0,89 ‰ (в середине пролета в поперечном направлении снизу плиты, датчик И1), что свидетельствует о работе бетона с трещинами (деформации трещинообразования ε_{cr} согласно СП 5.03.01 составляют 0,053...0,067 ‰) и упругой работе арматуры (на уровне 40 % от деформаций ε_{sy} согласно СП 5.03.01). Полученные результаты перемещений и относительных деформаций не учитывают собственный вес плиты, но в целом свидетельствуют об упруго-пластической работе железобетона для примененных нагрузок.

4. Методика натурных огневых испытаний предполагала проведение комплекса теплофизических измерений посредством ТП и тепловизионной камеры FLIR T420bx, а также измерений перемещений отдельных точек перекрытия преимущественно в вертикальном направлении.

5. В процессе натуральных огневых испытаний в ходе сжигания естественным образом пожарной нагрузки в виде отработанного моторного масла объемом 2405 л (2,1 т) и древесины объемом 1,8 м³ был получен огневой режим, в целом соответствующий стандартному температурному режиму. Температура на обогреваемой поверхности перекрытия достигала 1000 °С, при этом на необогреваемой стороне температура была не выше 40 °С, что привело к существенным деформациям перекрытия, суммарно между центром и консольными краями – около 300 мм, либо 1/30 от геометрической длины плиты.

6. Разрушение фрагмента произошло на 69-й мин от начала объемного пожара с внезапным разрушением центрифугированных колонн и падением железобетонного монолитного перекрытия до уровня +400 мм (высота монолитных шпонок [2]). После исследования остывшего монолитного перекрытия было обнаружено 2 линейных пластических шарнира внутри пролета, каждый на расстоянии 1,5 м от опоры (по линии обрыва дополнительного армирования). Момент образования пластических шарниров достоверно не известен и является предметом дальнейших исследований. В ходе изучения повреждений плиты были зафиксированы значительные повреждения защитного слоя бетона, вызванные процессами хрупкого взрывообразного разрушения.

Авторы выражают огромную признательность за помощь в организации и проведении моделирования, расчетов, конструирования и испытаний И.И. Полевода, Д.С. Неханю, Д.И. Навою, О. А. Трусу, М.М. Журову, Н.М. Олесиюку, Л.А. Крееру, Д.С. Игнатовичу, А.С. Дробышу, А.Е. Лупандину, А.М. Борейко, А.Н. Челаку, руководителю испытательно-исследовательского полигона учреждения «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» Ю.П. Ивлеву за предоставленные термоэлектрические преобразователи и тепловизионную камеру, специалистам РУП «БелНИИС» Д.А. Сокольчику и Н.Г. Бурсову за предоставленное оборудование для проведения силовых испытаний и Е.В. Бобруку за предоставленный тахеометр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов, В.А. Конструирование железобетонного монолитного перекрытия в составе фрагмента каркасного здания для исследований огнестойкости в рамках натуральных огневых испытаний / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 33–48. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.5-1.33.
2. Полевода, И.И. Результаты натуральных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 142–159. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
3. Нехань, Д.С. Исследования температуры газовой среды при проведении натуральных огневых испытаний строительных конструкций / Д.С. Нехань [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 130–141. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
4. Жовна, В.В. Огнестойкость железобетонных каркасов зданий с плоскими сборно-монолитными перекрытиями, образованными многпустотными плитами / В.В. Жовна [и др.] // Строительная наука и техника. – 2006. – № 4(7). – С. 42–51.
5. Жовна, В.В. Экспериментальные испытания железобетонных сборно-монолитных плоских перекрытий, образованных многпустотными плитами для определения фактических пределов огнестойкости конструкций / В.В. Жовна [и др.] // Строительная наука и техника. – 2007. – № 4(13). – С. 43–50.
6. Кудряшов, В.А. Оценка огнестойкости сборно-монолитного перекрытия со сборными многпустотными плитами / В.А. Кудряшов // Строительная наука и техника. – 2008. – № 4(19). – С. 37–42.
7. Полевода, И.И. Экспериментальные исследования огнестойкости стальных каркасных конструкций с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, В.А. Кудряшов, С.М. Жамойдик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 13–27.
8. Кудряшов, В.А. Огневые испытания натурального фрагмента стального каркаса здания с конструктивной огнезащитой и ограждением из ячеистых стеновых блоков / В.А. Кудряшов [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2016. – № 1(39). – С. 113–131.

**Результаты натурных огневых испытаний железобетонного монолитного перекрытия
в составе экспериментального фрагмента каркасного здания**
**Results of full-scale fire tests of the monolithic reinforced concrete slab
as part of a fragment of a frame building**

Кудряшов Вадим Александрович

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: vadmud@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4889-1060

Vadim A. Kudryashov

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

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: vadmud@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4889-1060

Жамойдик Сергей Михайлович

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, г. Минск, Беларусь
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Sergey M. Zhamoydik

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, Minsk, Belarus
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Кураченко Игорь Юрьевич

Учреждение «Научно-исследовательский
институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций» Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики
Беларусь, консультационный центр в области
обеспечения пожарной безопасности,
главный специалист

Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь
e-mail: i.kurachenko@yandex.by
ORCID: 0000-0002-2898-1811

Igor' Yu. Kurachenko

Research Institute of Fire Safety
and Emergencies of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus,
Fire Safety Advisory Center,
Chief Specialist

Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus
e-mail: i.kurachenko@yandex.by
ORCID: 0000-0002-2898-1811

Нгуен Тхань Киен

кандидат технических наук
Университет противопожарной безопасности
Министерства общественной безопасности
Вьетнама, факультет пожарной безопасности,
заместитель декана

Адрес: ул. Кхуат Зиу Тиен, 243,
район Тхань Суан, Ханой, Вьетнам
e-mail: thanhkienpcct34@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2710-0381

Nguyen Thanh Kien

PhD in Technical Sciences
University of Fire Fighting & Prevention
of the Ministry of Public Security of Vietnam,
Fire Safety Department, Deputy Dean

Address: Khuat Duy Tien, 243,
Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam
e-mail: thanhkienpcct34@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2710-0381

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.49>**RESULTS OF FULL-SCALE FIRE TESTS OF THE MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLAB AS PART OF A FRAGMENT OF A FRAME BUILDING****Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Nguyen T.K.**

Purpose. To develop methods and conduct force tests under loading, full-scale fire tests of a reinforced concrete monolithic slab as part of an experimental fragment of a framing building, to obtain experimental data on relative deformations and displacements during force tests, temperature distribution in the fire chamber, in structural sections, slab displacements during fire exposure and to assess the damage.

Methods. Force tests of reinforced concrete slab using inventory loads, a set of deflection meters and strain gauges; full-scale fire tests of a reinforced concrete monolithic floor under load using a hydrocarbon fire load, a complex of thermoelectric converters and a displacement measurement system.

Findings. A methodology has been developed and strength tests of a reinforced concrete cast-in-place slab as part of an experimental fragment of a frame building under a load of 675 kg / m² have been carried out. The slab deflection in the span was no more than 1/1000. The relative compressive strains of concrete in the maximum values did not exceed 0.36 ‰, the relative tensile strains of concrete in the maximum values were 0.89 ‰, which indicates the elastoplastic work of the structure. A technique was developed and full-scale fire tests of a cast-in-place slab as part of an experimental fragment of a frame building under a load of 675 kg / m² were carried out. With the use of 2405 liters of waste engine oil and 1.8 m³ of wood, a thermal fire rate close to the standard was created. The temperature on the heated surface reached 1000 °C, while on the unheated side the temperature was not higher than 40 °C, which led to significant deformations of the slab, in total between the center and the console edges it was about 300 mm, or 1/30th of the slab geometric length. As a result of tests on the 69th minute from the beginning of the flashover fire, unexpected destruction of the reinforced concrete centrifuged columns occurred. After the fragment collapsed, two linear plastic hinges were found in the span at a distance of 1.5 m from each support at the point where additional reinforcement has been cut.

Application field of research. The research results can be used to assess the fire resistance of reinforced concrete cast-in-place flooring, in the development of design methods and in the modeling of reinforced concrete cast-in-place structures under force loading and at fire, as well as in the development of methods for full-scale fire tests of reinforced concrete structures.

Keywords: fire resistance, fire resistance limit, reinforced concrete cast-in-place slab, experiment, frame building, test procedure, force tests, full-scale fire tests, building structures, destruction.

(The date of submitting: January 28, 2021)

REFERENCES

1. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Mordich M.M. Konstruirovaniye zhelezobetonnoy monolitnoy perekrytiya v sostave fragmenta karkasnogo zdaniya dlya issledovaniy ognestoykosti v ramkakh naturnykh ognevykh ispytaniy [Cast-in-place reinforced concrete plate construction as a part of a frame experimental building for fire resistance research]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 1. Pp. 33–48. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.33.
2. Polevoda I.I., Nekhan' D.S. Rezul'taty naturnykh ognevykh ispytaniy tsentrigirovannykh zhelezobetonnykh kolonn kol'tsevoogo secheniya [Results of full-scale fire test of spun reinforced concrete columns of annular section]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 142–159. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
3. Nekhan' D.S., Kurachenko I.Yu., Olesiyuk N.M., Kreer L.A. Issledovaniya temperatury gazovoy sredy pri provedenii naturnykh ognevykh ispytaniy stroitel'nykh konstruktsiy [Temperature studies of the gaseous medium during full-scale fire tests of building constructions]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 130–141. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
4. Zhovna V.V., Shtykh A.A., Kudryashov V.A., Mordich A.I., Belevich V.N. Ognestoykost' zhelezobetonnykh karkasov zdaniy s ploskimi sborno-monolitnymi perekrytiyami, obrazovannymi mnogo-pustotnymi plitami [Fire resistance of reinforced concrete frame structures with precast hollowcore slab floors]. *Construction science & engineering*, 2006. No. 4(7). Pp. 42–51. (rus)

5. Zhovna V.V., Shtykh A.A., Kudryashov V.A., Mordich A.I., Belevich V.N. Eksperimental'nye ispytaniya zhelezobetonnykh sborno-monolitnykh ploskikh perekrytiy, obrazovannykh mnogo-pustotnymi plitami dlya opredeleniya fakticheskikh predelov ognestoykosti konstruktsiy [Experimental tests of reinforced concrete composite precast-cast-in-place floors formed with multiple hollow slabs for determining the actual fire resistance limits in structures]. *Construction science & engineering*, 2007. No. 4(13). Pp. 43–50.
6. Kudryashov V.A. Otsenka ognestoykosti sborno-monolitnogo perekrytiya so sbornymi mnogo-pustotnymi plitami [Fire resistance of semi-continuous hollow core slab elements in deck structures]. *Construction science & engineering*, 2008. No. 4(19). Pp. 37–42. (rus)
7. Polevoda I.I., Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M. Eksperimental'nye issledovaniya ognestoykosti stal'nykh karkasnykh konstruktsiy s konstruktivnoy ognezashchitoy [Experimental study of steel frame structures fire resistance with structural fire protection]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 13–27. (rus)
8. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Lupandin A.E., Nguen T.K., Botyan S.S., Drobysh A.S. Ognevye ispytaniya naturnogo fragmenta stal'nogo karkasa zdaniya s konstruktivnoy ognezashchitoy i ograzhdeniem iz yacheistyykh stenovykh blokov [Full-scale steel frame with structural fire protection and autoclaved aerated concrete blocks enclosure fire testing]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2016. No. 1(39). Pp. 113–131.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.67>

УДК 614.844.2:699.814

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СПРИНКЛЕРНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Ощепков А.М., Грачулин А.В., Потеряев Ю.К., Рябцев В.Н., Лихоманов А.О.

Цель. Разработка и обоснование предложений по совершенствованию методики гидравлического расчета спринклерных автоматических установок пожаротушения.

Методы. Моделирование, проектирование, гидравлические расчеты, многофакторная оптимизация.

Результаты. Предложен модернизированный метод расчета производительности оросителей.

Область применения исследований. Полученные результаты могут применяться при разработке норм проектирования спринклерных автоматических установок пожаротушения, отдельные положения могут быть использованы при проектировании спринклерных автоматических установок пожаротушения в рамках действующих норм.

Ключевые слова: автоматическая установка спринклерного пожаротушения, спринклерный ороситель, расстояние между оросителями, интенсивность орошения, площадь пожара, гидравлический расчет.

(Поступила в редакцию 5 января 2021 г.)

Введение

Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г. определяет гармонизацию национальных ТНПА с международными. На основании сопоставления различных методик гидравлического расчета спринклерных автоматических установок пожаротушения (далее – МГР АУП) показано, что действующая в Беларуси МГР нуждается в гармонизации, поскольку имеет настолько существенные отличия от зарубежных методик, что затрудняет реализацию инвестиционных проектов с зарубежным капиталом и приводит к неоптимальным проектным решениям, которые неоправданно удорожают АУП.

Спринклерные АУП предназначены для локализации и (или) ликвидации пожара и одновременно с этим могут выполнять функции автоматической пожарной сигнализации¹. При этом АУП должны быть экономичными и эффективными², что подразумевает минимизацию их материалоемкости, стоимости монтажа и обслуживания при оптимизации расхода огнетушащего вещества (далее – ОТВ), обеспечивающего гарантированное подавление возгорания и предотвращение объемного развития пожара.

Свидетельства об эффективности спринклерных АУП различаются, причем, несмотря на то, что до 80 % возгораний подавляется единственным спринклером [1], отечественные и зарубежные авторы указывают, что для достижения эффективности спринклерных АУП 95–97 % на крупных объектах в расчет требуется включить не менее 36–40 оросителей [2; 3].

Задача гидравлического расчета спринклерных АУП сводится к установлению параметров водопитателя в зависимости от оптимального значения потерь напора спринклерной сети, которая включает спринклеры, трубопроводы, фитинги, запорную арматуру, узлы управления, дозаторы, фильтры и т.д.

Расчетный расход ОТВ определяется количеством спринклеров на расчетной площади и их производительностью. Расчетная площадь имеет форму многоугольника и находится в районе наиболее удаленного от водопитателя и высокорасположенного (диктующего) оросителя. Интенсивность орошения из близко и низко расположенных к водопитателю спринклерных оросителей будет больше, нежели у наиболее отдаленных и высокорасположенных, вследствие чего и количество вскрываемых спринклеров будет меньше [4].

Принцип МГР АУП заключается в последовательном нахождении потерь напора и расходов ОТВ в узлах спринклерной сети по мере приближения от диктующего оросителя

¹ Система стандартов безопасности труда. Установки пожаротушения автоматические. Общие технические требования: ГОСТ 12.3.046-91. – Введ. 01.01.93. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 8 с.

² Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.92. – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

к водопитателю. Объемный расход $Q_{ор}$ (л/с) распыляемого спринклером ОТВ определяется по формуле:

$$Q_{ор} = k\sqrt{H}, \quad (1)$$

где k – коэффициент производительности, л / (с · м^{0.5}); H – напор, м.

Величина k , зависящая от диаметра сопла и конструкции оросителя, является паспортной и может быть определена по формуле:

$$k = \mu\omega\sqrt{2g}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент расхода отверстия, безразмерная величина; ω – площадь отверстия, м²; g – ускорение свободного падения, м/с².

В европейской МГР расход по формуле (1) считается в л/мин, а давление в бар, при этом выражение (2) именуется K -фактором (л / (мин · бар^{0.5})).

Для выбора k и определения H необходимо определить нормативную интенсивность орошения I_n и расчетную площадь оросителя F_p , т.е. долю защищаемой площади, приходящуюся на один спринклер. F_p зависит от расстановки оросителей и при симметричной расстановке спринклеров имеет форму квадрата или прямоугольника [5–10] (рис. 1).

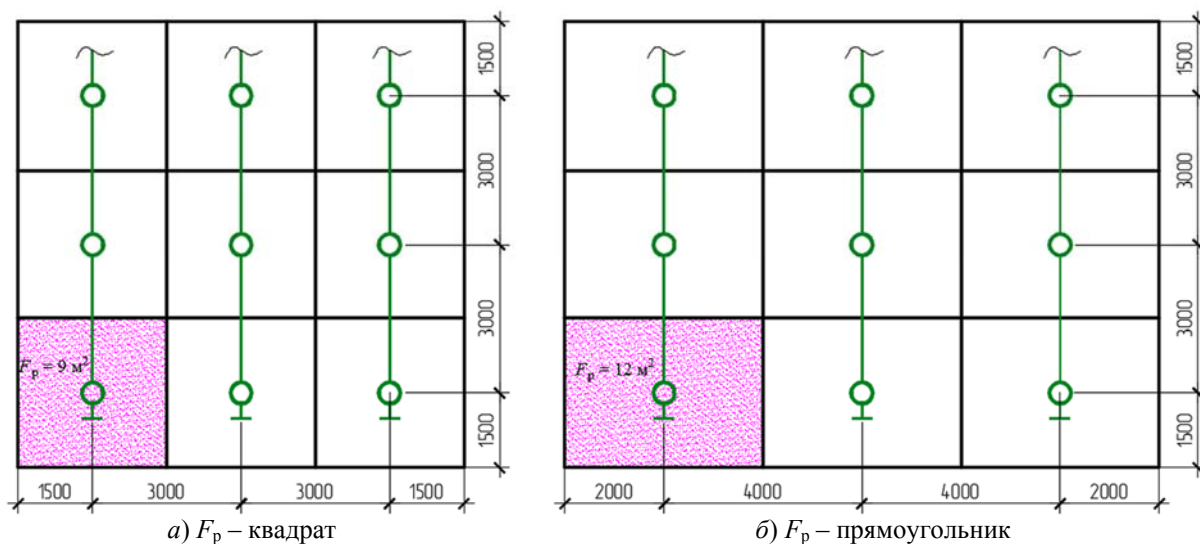
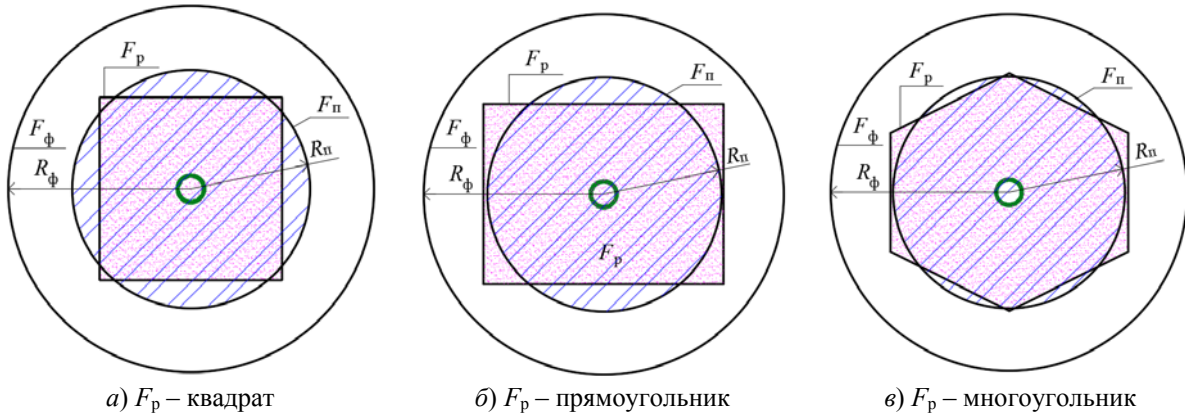


Рисунок 1. – Формы расчетной площади

В работах [6; 11] показано, что обычно расстояние между оросителями предусматривают с учетом принятого в промышленной архитектуре шага между колоннами (6×6 м). При расчетной площади на один ороситель 9 м² расстояние между рядками и оросителями принимается равным 3 м, а при расчетной площади 12 м² расстояние между оросителями принимается 3 м, а между рядками 4 м (рис. 2).

Для нахождения минимально допустимого расхода диктующего оросителя $Q_{мин}$ достаточно расчетную площадь F_p умножить на нормативную интенсивность орошения I_n , а затем по формуле (1) необходимо определить фактический расход диктующего оросителя $Q_{дикт}$ из условия, что он должен быть больше либо равен минимально допустимому $Q_{мин}$, для чего итерациями необходимо подобрать рабочий напор H для оросителя с заданным k .

Фактическая площадь орошения $F_{ф}$ зависит от конструкции оросителя, давления, высоты расположения оросителя, вида ОТВ. При вертикальном расположении оросителя она имеет форму круга и всегда превышает расчетную F_p , имеющую форму многоугольника (не только прямоугольника и квадрата), и паспортную F_n , имеющую форму круга (рис. 2).



а) F_p – квадрат
 б) F_p – прямоугольник
 в) F_p – многоугольник
Рисунок 2. – Взаимное позиционирование фактической площади орошения F_ϕ , паспортной защищаемой площади F_π и расчетной площади F_p оросителя (R_ϕ , R_π – соответствующие радиусы)

Необходимо отметить: если использовать спринклеры с малым фактическим радиусом орошения R_ϕ на расчетной площади $F_p = 12 \text{ м}^2$ и максимально регламентированном расстоянии между оросителями $l_n = 4 \text{ м}$, что, например, выполняется при сетке оросителей $3 \times 4 \text{ м}$, на всей защищаемой площади помещения F_z будут отсутствовать неорошаемые зоны (рис. 3).

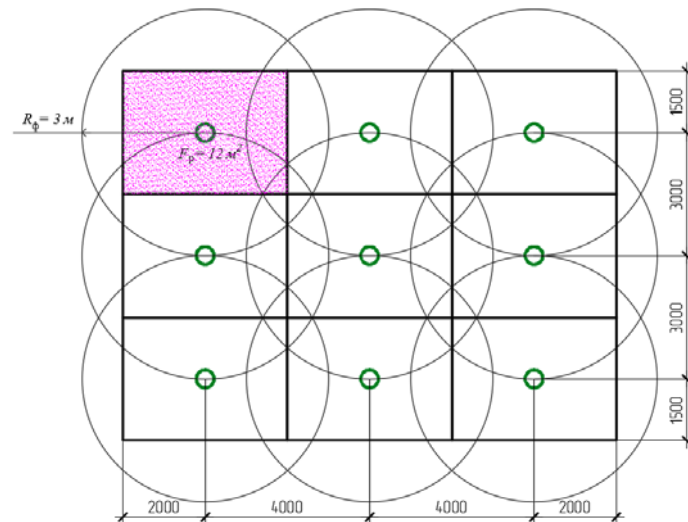


Рисунок 3. – Карта орошения при $R_\phi = 3 \text{ м}$

Площадь орошения и интенсивность распределения ОТВ $I_{\text{отв}}$ внутри факела распыла у оросителей значительно различаются. Некоторые авторы предполагали [9; 10], что более эффективным будет ороситель, подающий максимальный расход на паспортную защищаемую площадь спринклера (рис. 3), что характеризуется коэффициентом использования ОТВ [12]:

$$\eta = Q_n / Q_{\text{ор}}, \quad (4)$$

где Q_n – расход, приходящийся на паспортную защищаемую площадь, л/с.

Другие авторы [12], напротив, предполагали, что в условиях неопределенности места расположения возможного очага пожара относительно схемы расстановки оросителей, целесообразно применение спринклеров с широким факелом распыла.

Когда I определяется на паспортной защищаемой площади единственного диктующего оросителя, то широкий факел распыла означает существенное снижение величины η , что, в свою очередь, приводит к завышенному расчетному расходу АУП.

Таким образом, задача оптимального проектирования АУП является многофакторной, при этом можно выделить ключевой параметр, определяющий расход ОТВ и материалоемкость АУП – нормативная интенсивность орошения I_n в наиболее удаленной от водопитателя зоне защищаемого объекта (диктующей). Сегодня существуют два принципиально различных подхода к обеспечению заданной интенсивности при проектировании АУП: либо она должна обеспечиваться факелом распыла единственного диктующего оросителя (МГР 1), либо в среднем превышать нормативную на всей защищаемой площади и дикто-

ваться несколькими ближайшими оросителями в наиболее проблемной зоне (МГР 2). Первый подход действует в Российской Федерации с 2009 г.³ и Республике Беларусь с 2016 г.⁴, второй подход широко используется в зарубежных стандартах^{5, 6}, а также, что примечательно, успешно применялся ранее в советских МГР АУП^{7, 8}.

Выполнение действующей в Республике Беларусь МГР-1, в которой I_n создается единственным оросителем, вынуждает завышать расход оросителя – причем настолько существенно, что нормативные расчетные площади пожара пришлось вдвое сократить, чтобы обеспечить приемлемый максимальный расход и сохранить разумную энергетику АУП. На практике данный подход ведет к увеличению числа оросителей и, следовательно, секций, т.е. приводит к удорожанию АУП и снижению ее надежности вследствие усложнения системы. Данная статья показывает целесообразность применения МГР-2 как гарантированно обеспечивающего нормативную интенсивность орошения на максимальной площади и позволяющего оптимизировать АУП по критериям эффективности и экономичности.

Основная часть

Современный подход к выбору оросителей состоит в том, что в зависимости от характеристик защищаемого объекта и пожарной нагрузки применяются различные типы оросителей, формирующие наиболее подходящий факел распыла с заданной дисперсностью ОТВ (от субмикронного аэрозоля до крупных капель диаметром порядка 1–5 мм). Зарубежные производители в технической документации на спринклеры указывают соответствующие зоны опасности. Например, спринклеры с увеличенным радиусом орошения предназначены для защиты больших площадей, чем указано в правилах установки стандартных спринклеров, и одобрены для легких, обычных и особо опасных помещений в принятой зарубежной классификации. Или другой пример, «жилые» спринклеры, предназначенные для защиты домов, квартир, студенческих общежитий и некоторых отелей, специально разработаны для отвода воды выше по стенам, чтобы поддерживать более низкую температуру потолочного газа при пожаре, что помогает предотвратить вспышку и тем самым повысить вероятность выживания человека. Это обеспечивает высокую эффективность АУП, оптимизацию расхода ОТВ и, следовательно, минимизацию материалоемкости и стоимости АУП.

Следует отметить, что напор перед диктующим оросителем в зависимости от числа вскрывшихся спринклеров может отличаться в несколько раз. Обычно на расчетном (максимальном) расходе трубопроводы АУП работают в области квадратичных сопротивлений при числах Рейнольдса порядка 10^5 и более, поскольку с целью сокращения материалоемкости системы в трубах допускается скорость движения воды до 10 м/с. Исходя из практического опыта отметим, что оптимальная скорость ОТВ в питающих трубопроводах АУП составляет около 2–4 м/с. Хотя в случае срабатывания единственного спринклера режим течения изменится, потери напора примерно можно оценить как часть $(1/N)^2$ от полных потерь на расчетном режиме (где N – количество спринклеров на расчетной площади). Насос при этом станет работать в области максимального напора, и перед спринклером будет напор, примерно равный максимальному напору насоса за вычетом пьезометрической разницы высот между оросителем и верхним уровнем воды в резервуаре, поскольку гидравлические потери весьма малы. Расход ОТВ через спринклер в этом случае оказывается в 1,5–2 раза выше, чем при расчетной нагрузке АУП (при вскрытии всех оросителей на расчетной площади), особенно если речь идет о диктующем оросителе в системе с сотнями спринклеров. Следовательно,

³ Система противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования: СП 5.13130.2009. – Введ. 01.05.09 – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 103 с.

⁴ Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования = Пажарная аўтаматыка будынкаў і збудаванняў. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-2.02-190-2010 (02250). – Введ. 01.06.12 (изм. № 4 от 01.08.2016). – Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2011. – 82 с.

⁵ NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems [Electronic resource] / National Fire Protection Association. – Quincy: National Fire Protection Association, 2019. – Mode of access: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=13>. – Date of access: 04.01.2021.

⁶ Fixed firefighting systems – Automatic sprinkler systems – Design, installation and maintenance is classified in these ICS categories: UNE EN 12845:2016. – Released: 22.10.2016 – European Committee for Standardization, 2015. – 211 p.

⁷ Инструкция по проектированию установок автоматического пожаротушения: СН 75-76 утв. Гос. Комитетом Совета Министров СССР по делам строительства 26.04.1976 № 52. – М.: Стройиздат, 1977. – 34 с.

⁸ Пожарная автоматика зданий и сооружений: СНиП 2.04.09-84. – Введ. 01.07.85. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 48 с.

единственный вскрывшийся диктующий спринклер создает избыточную интенсивность орошения, что вполне справедливо и для случая срабатывания нескольких спринклеров. Это является важным аргументом в пользу того, что проектирование АУП по МГР-2 не снижает вероятности быстрого подавления очага возгорания в наиболее удаленной от насоса зоне. При полной же нагрузке у оптимально спроектированной по этой методике АУП средняя интенсивность орошения расчетной площади пожара превышает нормативную на 10–15 %, а не в 2–3 раза, как это происходит при расчете по действующей в Республике Беларусь МГР-1.

Определение расхода по расчетной площади F_p позволяет учесть весь объемный расход, а также сгладить множество неопределенностей, присущих гидравлическому расчету АУП:

- неравномерность эпюры орошения спринклера;
- зависимость фактической интенсивности орошения от высоты расположения оросителя над очагом возгорания;
- влияние давления перед спринклером на эпюру орошения;
- многовариантность размещения спринклеров как по высоте, так и под углом к очагу возгорания;
- неравномерность и неопределенность размещения пожарной нагрузки и др.

Отметим, что сами значения нормативной интенсивности орошения определены усредненными и с большим запасом, причем с учетом того, что часть ОТВ не участвует в тушении, испаряясь, не достигает очага пожара или вытекает из зоны горения [13].

Крупные промышленные и гражданские объекты, защищаемые спринклерными АУП, имеют следующие особенности:

- высота помещений – до 20 м;
- наличие светоаэрационных фонарей;
- сложная форма перекрытий, наличие ферм, балок, ригелей, уклонов;
- разветвленная сеть инженерных коммуникаций;
- неравномерное распределение пожарной нагрузки.

Развитие пожара в таких помещениях сопровождается возникновением интенсивных конвективных потоков и быстрым распространением огня, а вскрытие спринклеров может произойти в стороне от очага возгорания. По данным причинам с точки зрения эффективности АУП сокращать расчетную площадь нецелесообразно.

Таким образом, расчет АУП по МГР-2 позволяет оптимизировать конструкцию установки – минимизировать ее материалоемкость и стоимость в расчете на 1 м² защищаемой площади, с хорошим запасом гарантируя обеспечение нормативной интенсивности орошения как в случае работы единственного диктующего оросителя, так и при орошении всей расчетной площади.

Действующий в Республике Беларусь подход к расчету АУП заключается в том, что производительность спринклера определяется по паспортной защищаемой площади F_n , имеющей форму круга⁹, причем расход, попадающий за пределы F_n , не учитывается в тушении. При этом данный подход вынуждает сокращать расстояние между спринклерами (рис. 4).

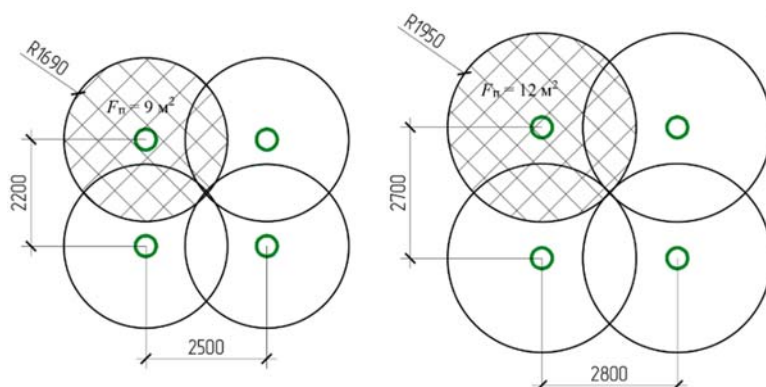


Рисунок 4. – Расстояние между спринклерами с учетом их паспортных защищаемых площадей $F_n = 9 \text{ м}^2$ и $F_n = 12 \text{ м}^2$

⁹ Система стандартов пожарной безопасности. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 11.16.06-2011/ГОСТ Р 51043-2002. – Введ. 01.01.12. – Минск: БелГИСС, 2011. – 33 с.

Это является следствием формального толкования действующей МГР-1, согласно которой при расстановке оросителей с максимально регламентированными ранее расстояниями 3 и 4 м образуются так называемые мертвые зоны (рис. 5, заштрихованы), в которых интенсивность орошения не подтверждена сертифицированными испытаниями и может быть ниже нормативной [14].

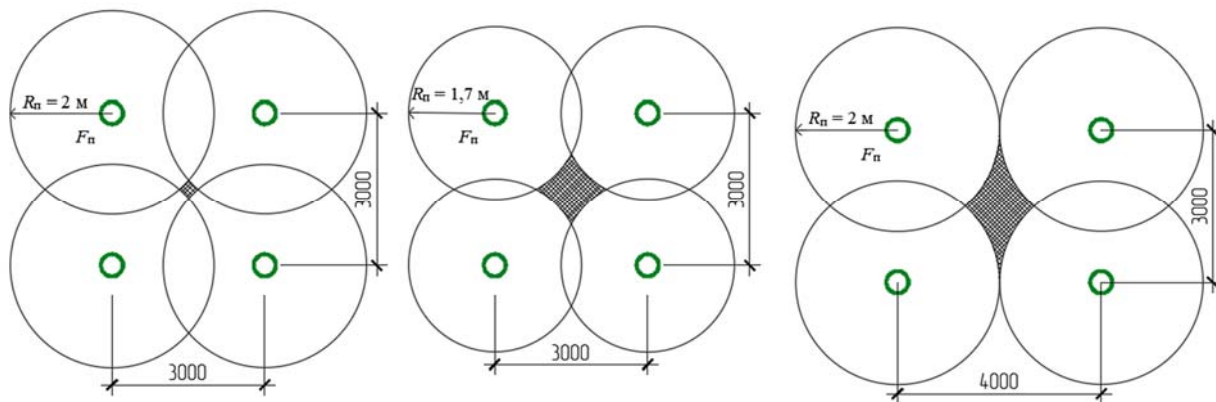


Рисунок 5. – Расстановка оросителей с максимально регламентированными ранее расстояниями 3 и 4 м с соблюдением паспортных защищаемых площадей $F_n \approx 9 \text{ м}^2$ ($R = 1,7 \text{ м}$) и $F_n \approx 12 \text{ м}^2$ ($R = 2 \text{ м}$)

Однако в действительности, поскольку $F_{\text{ф}} \gg F_n$, в данных зонах интерферируют факелы распыла 4 рядом расположенных оросителей (рис. 3), причем средняя интенсивность орошения на защищаемой ими площади оказывается заметно выше нормативной.

В новом российском своде правил¹⁰ установлено следующее: «за нормативную интенсивность орошения принимают интенсивность только диктующего оросителя в пределах площади круга 12 м^2 (радиус 2 м) без определения интенсивности в остальных частях защищаемой площади (т.е. в срединной части пространства между четырьмя оросителями интенсивность не принимают во внимание)». Данное важное уточнение позволяет расставлять оросители на расстояниях, равных и близких к ранее принятым оптимальным значениям, вплоть до максимально установленных в данном документе: 3,5 м для помещений групп 1–4.1 и 3 м для помещений групп 4.2–7.

Основанием для выбора оросителя служат его паспортные характеристики (рис. 6)¹¹.

По подобным графикам проектировщики определяют давление, которое необходимо создать у спринклера с заданным k для обеспечения нормативной интенсивности орошения I_n . Итоговое значение средней интенсивности орошения $I_{\text{ср}}$ на расчетной площади пожара $F_{\text{пж}}$ может в 2 раза и более превышать нормативное значение.

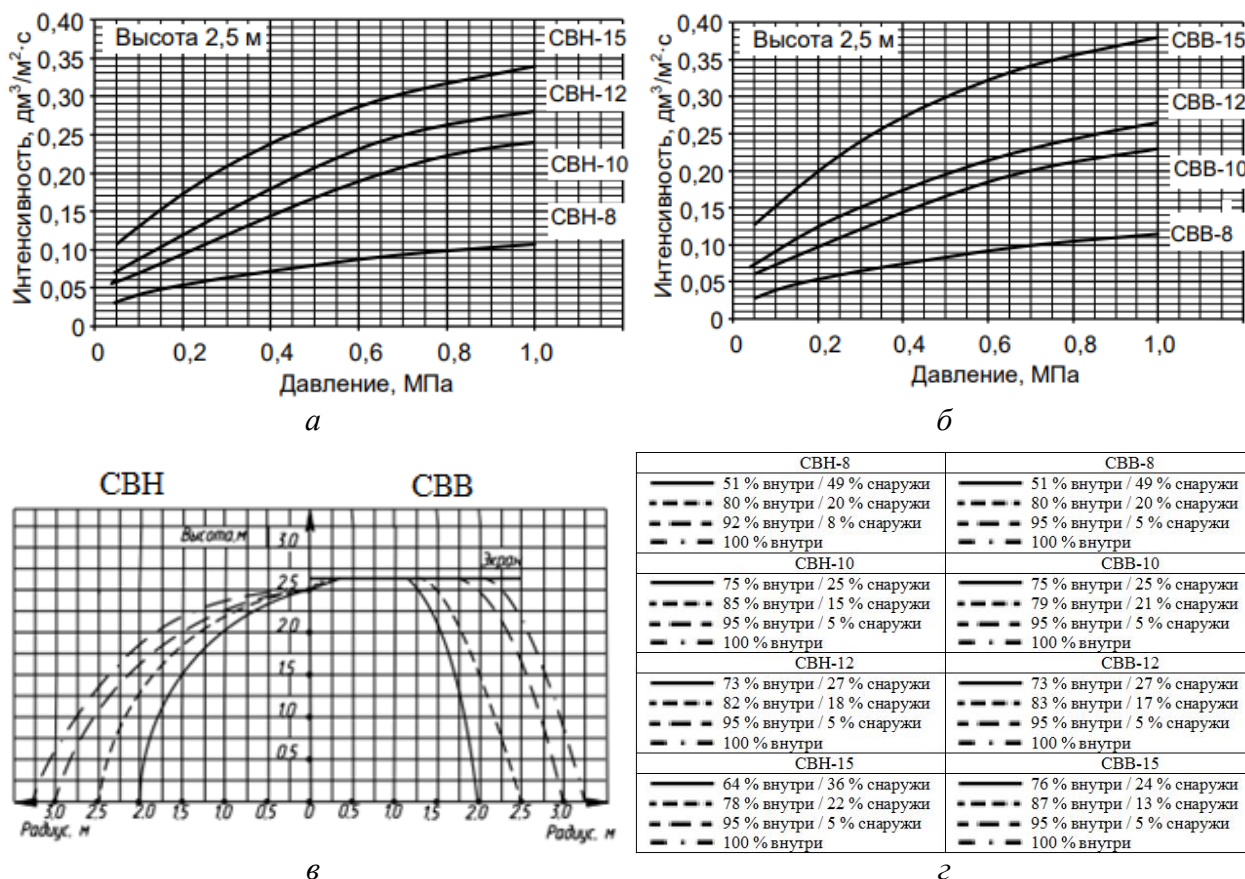
Завышение расхода АУП повлекло вынужденное сокращение расчетных площадей пожара, которые оказались в 2 раза меньше, чем в отмененных отечественных нормативах и в 2–2,5 раза меньше, чем в европейских и американских стандартах при сопоставимых интенсивностях орошения.

Анализ практики проектирования, строительства и эксплуатации АУП выявил существенные недостатки данного подхода:

1. Диаметры распределительных трубопроводов увеличились на 1–2 калибра, что сказалось не только на материалоемкости АУП, но и на инерционности воздушных систем.
2. Требуемый напор водопитателя увеличился до значений, близких к предельно допустимому, что повлекло необходимость строительства повышающих насосных станций в системах, которые могли бы работать от водопроводной сети.
3. Потребовалось уменьшать расстояние между оросителями, из-за чего рядки не вписываются в стандартный шаг пролетов и расстановка оросителей оказывается не оптимальной и влечет увеличение их количества.

¹⁰ Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования: СП 485.131.1500.2020 – Введ. 01.03.21. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2021. – 36 с.

¹¹ Ороситель спринклерный водяной «СВВ», «СВН»: Паспорт ДАЭ 100.203.000-02 ПС. – Бийск: ЗАО «ПО «СПЕЦАВТОМАТИКА», 2013. – 413 с.



а, б – графики зависимости интенсивности орошения от давления для оросителей модификации СВН (спринклерный водяной розеткой вниз) и СВВ (спринклерный водяной розеткой вверх) соответственно; в – эпюра орошения спринклеров; з – распределение интенсивности

Рисунок 6. – Паспортные характеристики оросителя

4. Вследствие неоптимальной расстановки оросителей, несмотря на сокращение расчетной площади пожара, увеличивается общий расход ОТВ, что требует строительства резервуаров большого объема.

5. Поскольку число спринклеров в секции нормативно ограничено, на крупных объектах с увеличением количества оросителей возросло и число секций (направлений при использовании сигнализаторов потока жидкости), а также общая длина трубопроводов.

6. Вследствие увеличения мощности насосов возросла энергоемкость АУП, что повлекло проблемы с энергообеспечением и удорожание резервных дизель-генераторов. С целью сохранения прежней энергоемкости модернизируемых АУП на многих объектах приходится применять воду со смачивателем с установкой дорогостоящих дозирующих устройств.

7. На некоторых объектах, где ранее применялись оросители общего назначения, приходится устанавливать значительно более дорогие оросители спецназначения (ESFR).

8. АУП, принятые в эксплуатацию до 2016 г., не соответствуют действующим нормам, и при их модернизации необходима практически полная замена оборудования насосной станции, распределительных трубопроводов и оросителей в защищаемых помещениях.

9. Расчет по МГР-1 не позволяет при необходимости выполнить замену оросителей разных производителей, поскольку при одинаковом коэффициенте производительности фактические характеристики спринклеров различаются.

10. Паспортные эпюры орошения даются до высоты 2,5 м при вертикальной оси факела распыла и при испытательных давлениях, а отличия фактической высоты, угла наклона и давления приводят к существенному изменению интенсивности орошения на расчетной площади.

11. Чрезмерный расход ОТВ увеличивает косвенный ущерб от его воздействия.

12. Применение МГР-1 существенно затрудняет реализацию инвестиционных проектов, основанных на Европейской нормативной базе.

Действующая зарубежная МГР обеспечивает более высокую достоверность расчета АУП, чем прежняя отечественная методика, хотя обе основаны на нахождении доли расчетной площади пожара, приходящейся на один спринклер. Отличия зарубежной МГР состоят в том, что:

- вычисляется минимальный возможный расход каждого оросителя, а не только диктующего;
- выполняется осреднение значения интенсивности орошения для группы из четырех ближайших оросителей;
- разбиение расчетной площади выполняется на различные многоугольники, а не только на прямоугольники и квадраты, что имеет место на реальных объектах при расстановке оросителей с учетом балок, светильников и других препятствий.

Следует отметить и другие отличия зарубежной методики от отечественной:

- иная классификация помещений;
- нормативные интенсивности орошения отличаются, но близки к СН 2.02.03-2019 для аналогичных объектов;
- нормативные площади пожара в 2–2,5 раза выше, чем в действующем СН 2.02.03-2019;
- продолжительность тушения пожара для водяных АУП варьируется иначе;
- расчетные площади пожара определяются в благоприятных и неблагоприятных гидравлических условиях работы сети, а не только в наиболее удаленной от водопитателя зоне;
- выполняется точный гидравлический расчет потерь в местных сопротивлениях, а не вводится осредненная добавка;
- детализированы особые требования для специальных опасностей (Early Suppression Fast-Response (ESFR) Sprinkler, Control Mode Specific Application (CMSA) Sprinkler, Control Mode Density / Area (CMDA) Sprinkler);
- имеются указания по подбору оптимальной рабочей точки насоса;
- даны указания по точности вычислений, допустимым невязкам давлений в узловых точках при гидравлическом расчете кольцевых систем.
- гидравлическое сопротивление шероховатых труб рассчитывается по формулам как Хазена – Вильямса, так и Дарси – Вейсбаха [15].

Если принимать данные отличия, то будет обеспечена рациональная расстановка оросителей, эффективная защита объекта и оптимизация конструкции АУП.

К сожалению, многочисленные труды разработчиков прошлой отечественной МГР АУП не нашли подробного изложения в нормативной документации в части порядка определения расхода диктующего оросителя, поэтому приведем предложения по модернизации МГР, взяв за основу зарубежные и отечественные методики.

1. Расчетную площадь F_p каждого оросителя следует определять следующим образом: провести срединные перпендикуляры к отрезкам, соединяющим ближайшие оросители, продлив их до пересечения с другими такими перпендикулярами или границей защищаемой зоны (в случае размещения оросителя у границы защищаемой зоны, например стены). Площадь многоугольника, образованного ближайшими к оросителю указанными перпендикулярами и участками границы защищаемой зоны, и будет расчетной площадью F_p этого оросителя (рис. 7).

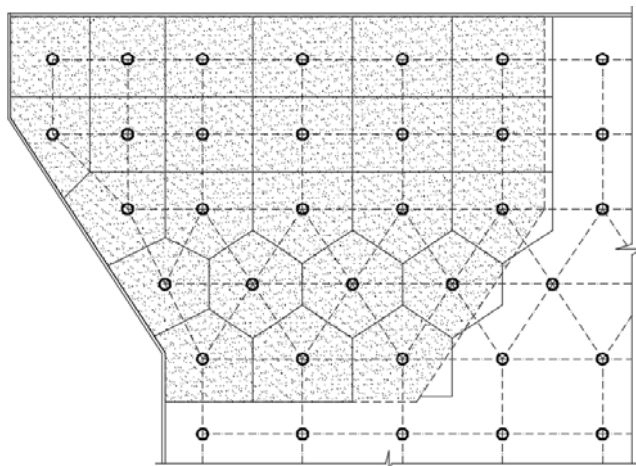


Рисунок 7. – Определение расчетной площади каждого оросителя

2. Минимальный допустимый расход каждого оросителя $Q_{\min}$ следует определять по формуле:

$$Q_{\min} = I \cdot F_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где I – нормативная интенсивность орошения, л / (с · м²); $F_{\text{ср}}$ – наибольшее среднее арифметическое четырех значений F_p , найденных для одного оросителя и трех ближайших к нему оросителей, м²; если количество спринклеров, которые свободно соединены между собой, меньше 4, то $F_{\text{ср}}$ принимается по наибольшему F_p .

3. В приближенных расчетах (без использования специализированного программного обеспечения) минимально допустимый расход диктующего оросителя $Q_{\text{дикт(мин)}}$ допускается принимать равным максимальному значению $Q_{\min}$.

4. Расход оросителя $Q_{\text{ор}}$ следует определять по формуле (1).

5. Расстановку оросителей следует выполнять исходя из одновременного выполнения следующих условий:

а) расстояние по горизонтали между спринклерными оросителями должно не превышать максимально установленное для конкретного типа оросителя, для оросителей общего назначения – 4 м для помещений групп 1–4.1, 3 м – для помещений групп 4.2–7;

б) расстояние по горизонтали между спринклерными оросителям должно быть не менее 1,5 м;

в) расстояние по горизонтали от ближайших спринклерных оросителей до стен должно быть не более 2 м для помещений групп 1–4.1, 1,5 м – для помещений групп 4.2–7;

г) расчетная площадь F_p каждого оросителя должна не превышать установленной для конкретного типа: для оросителей общего назначения – 12 м² для помещений групп 1–4.1, 9 м² – для помещений групп 4.2–7;

д) с учетом высоты помещения, уклона потолка (наклона спринклеров к очагу возгорания), эпюр орошения, препятствий должен орошаться каждый квадратный метр защищаемой площади со средней интенсивностью не ниже нормативной.

Далее для оценки количественных различий представленных выше МГР проведено технико-экономическое сравнение параметров АУП для одной секции на реальном объекте. Стоит отметить, что применение зарубежной методики требует итерационных вычислений с применением специализированного программного обеспечения, в связи с чем в сравнении она не представлена. Характеристики типового промышленного объекта (исходные данные) представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики типового промышленного объекта

Наименование объекта	Цех вулканизации
Защищаемая площадь	6938 м ²
Высота помещения	18,2 м
Перечень горючих материалов	Резинотехнические изделия
Категория помещения по взрывопожарной и пожарной опасности	B1
Группа помещения	3
Класс функциональной пожарной опасности	Ф.5.1
Класс зоны ПЭУ	П-Па
Относительная влажность при нормальных условиях	≤ 80 %
Скорость воздушных потоков	0,1–0,3 м/с
Пределы температур	от +16 до +21 °С
Конструктивные особенности защищаемого помещения	Сложная форма перекрытия, наличие уклонов, ферм, балок, светоаэрационных фонарей
Максимальная рабочая температура окружающей среды в зоне расположения спринклерных оросителей	Свыше 38 до 50 °С включительно, в зоне расположения светоаэрационных фонарей возможно скопление нагретого воздуха, воздействие солнечной тепловой радиации на тепловой замок спринклера и достижение температуры до 70 °С включительно
Тип вентиляции	Приточно-вытяжная с естественным и искусственным побуждением
Нормативный расход на пожарные краны	2 струи по 5 л/с

Поскольку МГР-1, действующая в РФ, позволяет сохранить оптимальную расстановку оросителей, то включим ее в сравнение. Результаты расчетов АУП по различным вариантам МГР представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты расчетов

Параметры расчета	Результаты расчета по различным МГР		
	МГР-1		МГР-2
	по СН 2.02.03-2019	по СП 485.131.1500.2020	модернизированная
Определяющий фактор при расстановке оросителей	Отсутствие зон, не-покрытых F_n (рис. 4)	$l_{i-j} \leq l_n$ (рис. 5)	$\begin{cases} l_{i-j} \leq l_n, \\ F_p \leq F_n \end{cases}$
Нормативная площадь пожара для гидравлического расчета $F_{\text{пож}}$, м ²	180		360
Вид ОТВ	Вода с добавлением смачивателя WA с концентрацией 0,5 %		
Нормативная интенсивность орошения I_n , л / (с·м ²)	0,24 (принимается в 1,5 раза меньше, чем для воды)		
Паспортная защищаемая площадь F_n , имеющая форму круга, м ²	12		
Расчетная площадь F_p , имеющая форму многоугольника, м ²	6,0	9,0	9,15
Максимальная нормативная расчетная площадь F_n , имеющая форму многоугольника, м ²	Для расчета не требуется		12
Максимальное нормативное расстояние между оросителями, м	Не установлено	3,5	4,0
Минимально допустимый расход 1 оросителя, л/с	Для расчета не требуется		$I_n \cdot F_p = 2,20$
Принятый по проекту тип оросителя	СВВ-15		СВВ-K115
Коэффициент производительности оросителя, л / (с·м ^{0,5})	0,77		0,60
Требуемый напор у диктующего оросителя, м	30		14
Расход диктующего оросителя, л/с	4,217		2,24
Продолжительность подачи ОТВ, мин	60		
Количество оросителей на расчетной площади пожара N , шт.	30	20	40
Количество оросителей под перекрытием, шт.	1088	768	768
Количество оросителей под технологическими площадками и воздуховодами, шт.	29	29	29
Общее количество оросителей в секции, шт.	1117	797	797
Максимальное нормативное количество оросителей, шт.	1200 (с использованием сигнализаторов потока жидкости, что потребовало разбить секцию по двум направлениям)	800 (дополнительных устройств для идентификации не потребовалось)	
Расчетный расход на спринклеры, л/с	140,5	93,6	99,1
Средняя интенсивность на расчетной площади пожара, л / (с·м ²)	0,78	0,52	0,27
Превышение средней интенсивности над нормативной, %	225,0	116,6	12,5
Количество пожарных кранов, шт.	32	32	32

Продолжение таблицы 2

Параметры расчета	Результаты расчета по различным МГР		
	МГР-1		МГР-2
	по СН 2.02.03-2019	по СП 485.1311500.2020	модернизированная
Расчетный расход на пожарные краны, л/с	13,8	13,8	13,8
Количество вводов в секцию	Два ввода, 2-й ввод осуществлен от смежной секции		
Суммарный расчетный расход секции, л/с	154,3	107,4	112,9
Условный диаметр трубопроводов, мм (длина): a – питающих; b – распределительных; c – всасывающих; d – подводящих	a. DN150 (483 м), DN100 (649 м); b. DN50 (2100 м), DN65 (231 м); c. DN300 (35 м); d. DN250 (90 м)	a. DN150 (426 м), DN100 (619 м); b. DN40 (2100 м), DN50 (231 м); c. DN250 (35 м); d. DN200 (90 м)	a. DN150 (426 м), DN100 (619 м); b. DN32 (2100 м), DN40 (231 м); c. DN250 (35 м); d. DN200 (90 м)
Общая масса трубопроводов и фитингов, кг	23 750	22 715	21 318
Расчетный напор перед узлом управления, м	89,70	72,30	60,98
Расчетные параметры водопитателя	560 м ³ /ч при напоре 100 м	390 м ³ /ч при напоре 82 м	410 м ³ /ч при напоре 70 м
Фактическое количество и объем типовых подземных железобетонных резервуаров противопожарного запаса воды, м ³	2 × 350 м ³	2 × 250 м ³	2 × 250 м ³
Расчетный объем смачивателя с учетом положительной погрешности дозирования +30 %, м ³	3,64	2,54	2,66
Фактический объем бака-дозатора, м ³	4	3	3
Количество насосов	2 основных и 1 резервный		
Общая мощность основных насосов, кВт	220	150	150
Общая стоимость АУП на 01.01.2021 (оборудование, материалы, монтаж), тыс. у.е.	290	223	220

Выполненное сравнение показывает предпочтительность применения МГР-2 АУП в сравнении с МГР-1, поскольку расчет по данной методике обеспечивает превышение средней интенсивности над нормативной с разумным запасом, тогда как действующая методика приводит многократному превышению средней интенсивности над нормативной, требует соответствующего сокращения расчетной площади, приводит к неоптимальным конструктивным решениям, что снижает надежность АУП и удорожает ее строительство.

Заключение

1. МГР-1 и МГР-2 являются упрощенными в том смысле, что не учитывают реальную неравномерность факела распыла ударно-струйной форсунки (чем и является ороситель), равно как неравномерность распределения пожарной нагрузки и ряд иных факторов. Предлагается ввести понятие расчетного участка, определяющего шаг дискретизации расчетной площади при вычислении средней интенсивности орошения, и принять в качестве расчетного участка часть расчетной площади, приходящуюся на один ороситель. Вместо того чтобы добиваться формального соблюдения норматива в каждой точке, предлагается гарантировать нормативную интенсивность в целом на каждом расчетном участке.

2. Предлагается гармонизировать отечественную МГР с зарубежными стандартами, что обеспечит снижение материалоемкости, стоимости АУП на 20–30 % и повышение эффективности АУП на крупных объектах, приведет к снижению ущерба от ОТВ, позволит «сгладить» множество неопределенностей, присущих гидравлическому расчету АУП, а также поспособствует созданию более благоприятного климата для инвестиционных проектов с зарубежным капиталом.

3. На первом этапе гармонизации стандартов предлагается унифицировать МГР-1 с действующей в РФ, т.е. нормировать допустимые расстояния между оросителями и не

принимать во внимание интенсивность орошения в срединной части пространства между четырьмя близко расположенными оросителями (рис. 5).

4. Предлагается ввести в МГР указания по достаточной точности вычислений и допустимой величине невязок напоров в узловых точках при гидравлическом расчете кольцевых систем. Рекомендуются вычислять напор и потери напора в метрах, а не давление и потери давления в мегапаскалях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ahrens, M. U.S. Experience with sprinklers: report / M. Ahrens. – Quincy: NFPA Research, 2017. – 35 p.
2. Frank, K. A review of sprinkler system effectiveness studies / K. Frank, N. Gravestock, M. Spearpoint, C. Fleischmann // Fire Science Reviews. – 2013. – Vol. 2 (6). – 19 p. DOI: 10.1186/2193-0414-2-6.
3. Лобачев, В.Г. Противопожарное водоснабжение: учеб. пособие для пожарно-технических учебных заведений / В.Г. Лобачев; под общ. ред. инж.-полк. Д.М. Корельского. – М.; Л.: Изд-во министерства коммунального хоз-ва РСФСР, 1950. – 347 с.
4. Тарасов-Агалков, Н.А. Упрощенный расчет спринклерных сетей / Н.А. Тарасов-Агалков // Научно-технический бюллетень ЦНИИПО. – 1939. – № 1. – С. 61–79.
5. Ходаков, В.Ф. Автоматические установки водяного пожаротушения / В.Ф. Ходаков. – Киев: Будівельник, 1970. – 37 с.
6. Веселов, А.И. Автоматическая пожаро- и взрывозащита предприятий химической и нефтехимической промышленности / А.И. Веселов, Л.М. Мешман. – М.: Химия, 1975. – 280 с.
7. Бубырь, Н.Ф. Установки автоматической пожарной защиты / Н.Ф. Бубырь [и др.]. – М.: Стройиздат, 1979. – 176 с.
8. Баратов, А.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов. – М.: Химия, 1979. – 368 с.
9. Бубырь, Н.Ф. Пожарная автоматика: учеб. пособие для пожарно-технических училищ / Н.Ф. Бубырь, В.П. Бабуров, В.И. Мангасаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 208 с.
10. Родэ, А.А. Автоматические установки для тушения пожаров / А.А. Родэ, Е.Н. Иванов, Г.В. Климов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. – 190 с.
11. Аммосов, Ф.А. Противопожарная защита бесфонарных зданий / Ф.А. Аммосов, М.Я. Ройтман, Н.А. Тарасов-Агалков. – М.: Стройиздат, 1965. – 126 с.
12. Мешман, Л.М. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / Л.М. Мешман [и др.]. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2002. – 413 с.
13. Иванов, Е.Н. Расчет интенсивности орошения / Е.Н. Иванов // Сб. ЦНИИПО. Пожарная профилактика и пожаротушение. – Вып. I. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 52–58.
14. Бабурин, В.В. Оценка эффективности спринклерных оросителей / В.В. Бабурин [и др.] // Технологии техносферной безопасности (интернет-журнал). – 2012. – Т. 44, № 4. – 6 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-4/05-04-12.ttb.pdf>.
15. Wass, Jr. Sprinkler Hydraulics. A Guide to Fire System. Hydraulic Calculations / Jr. Wass, S. Harold, P.E. Fleming, P. Russell. – Third Edition. – The Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 2020. – 291 p.

**Совершенствование методики гидравлического расчета спринклерных
автоматических установок пожаротушения**
**Improvement of the method of hydraulic calculation of sprinkler
automatic fire extinguishing units**

Ощенко Андрей Михайлович

Общество с ограниченной ответственностью
«СитиСофт», директор
Адрес: пер. Инструментальный, 4, ком. 10,
220012, г. Минск, Беларусь
e-mail: andrey@oschepkov.by

Andrey M. Oshchepkov

Limited Liability Company «CitySoft»,
Director
Address: Instrumental'nyy per., 4, room 10,
220012, Minsk, Belarus
e-mail: andrey@oschepkov.by

Грачулин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», ученый секретарь
Совета университета
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: Grachulin@ucp.by
ORCID: 0000-0003-3832-8258

Aleksandr V. Grachulin

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Academic Secretary of the University
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: Grachulin@ucp.by
ORCID: 0000-0003-3832-8258

Потеряев Юрий Константинович

кандидат технических наук
Группа компаний «Пожнефтехим»,
заместитель директора по развитию
Адрес: Рязанский пр-т, 10, стр. 18,
этаж 6, ком. 1–7,
109428, г. Москва, Россия
e-mail: iwbc2020@gmail.com

Yuriy K. Poteryaev

PhD in Technical Sciences
Pozhneftekhim Group of Companies,
Deputy Director for Development
Address: Ryazanskiy prospect, 10, bldg. 18,
6 floor, rooms 1–7,
109428, Moscow, Russia
e-mail: iwbc2020@gmail.com

Рябцев Виталий Николаевич

кандидат технических наук
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
начальник кафедры
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: v.reabtsev@ucp.by
ORCID: 0000-0002-2830-591X

Vitaly N. Ryabtsev

PhD in Technical Sciences
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Head of the Chair
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: v.reabtsev@ucp.by
ORCID: 0000-0002-2830-591X

Лихоманов Алексей Олегович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: alexlikh20@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9374-1486

Aleksey O. Likhomanov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: alexlikh20@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9374-1486

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.67>

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF HYDRAULIC CALCULATION OF SPRINKLER AUTOMATIC FIRE EXTINGUISHING UNITS

Oshchepkov A.M., Grachulin A.V., Poteryaev Yu.K., Ryabtsev V.N., Likhomanov A.O.

Purpose. Development and justification of proposals for improving the methodology for hydraulic calculation of automatic sprinkler fire extinguishing installations.

Methods. Modeling, designing, hydraulic calculations, multi-factor optimization.

Findings. A modernized method for calculating the discharge rate from sprinklers is proposed.

Application field of research. The obtained results can be used in the development of design standards for automatic sprinkler fire extinguishing installations, certain provisions can be used in the design of automatic sprinkler fire extinguishing installations within the framework of current standards.

Keywords: automatic sprinkler fire extinguishing installation, sprinkler, sprinkler spacing, spraying intensity, fire area, hydraulic calculation.

(The date of submitting: January 5, 2021)

REFERENCES

1. Ahrens M. U.S. Experience with sprinklers: report. Quincy: NFPA Research, 2017. 35 p.
2. Frank K., Gravestock N., Spearpoint M., Fleischmann C. A review of sprinkler system effectiveness studies. *Fire Science Reviews*, 2013. Vol. 2 (6). 19 p. DOI: 10.1186/2193-0414-2-6.
3. Lobachev V.G. *Protivopozharnoe vodosnabzhenie* [Fire fighting water supply]: textbook for fire-technical educational institutions. Ed. by Korel'skiy D.M. Moscow; Leningrad: Izdatel'stvo ministerstva kommunal'nogo khozyaystva RSFSR, 1950. 347 p. (rus)
4. Tarasov-Agalkov N.A. Uproshchennyy raschet sprinklernykh setey [Simplified calculation of sprinkler systems]. *Nauchno-tekhnicheskiiy byulleten' TsNIPO*, 1939. No. 1. Pp. 61–79. (rus)
5. Khodakov V.F. *Avtomaticheskie ustanovki vodyanogo pozharotusheniya* [Automatic fire extinguishing installation]. Kyiv: Budivel'nik, 1970. 37 p. (rus)
6. Veselov A.I., Meshman L.M. *Avtomaticheskaya pozharo- i vzryvoshchita predpriyatiy khimicheskoy i neftekhimicheskoy promyshlennosti* [Automatic fire and explosion protection of chemical and petrochemical enterprises]. Moscow: Khimiya, 1975. 280 p. (rus)
7. Bubyri' N.F., Ivanov A.F., Baburov V.P., Mangasarov V.I. *Ustanovki avtomaticheskoy pozharoy zashchity* [Automatic fire protection installations]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 176 p. (rus)
8. Baratov A.N., Ivanov E.N. *Pozharotushenie na predpriyatiyakh khimicheskoy i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti* [Fire extinguishing at chemical and oil refining industries]. Moscow: Khimiya, 1979. 368 p. (rus)
9. Bubyri' N.F., Baburov V.P., Mangasarov V.I. *Pozharnaya avtomatika* [Fire automation]: textbook for fire-technical schools. The second edition. Moscow: Stroyizdat, 1984. 208 p. (rus)
10. Rode A.A., Ivanov E.N., Klimov G.V. *Avtomaticheskie ustanovki dlya tusheniya pozharov* [Automatic installations for extinguishing fires]. Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1965. 190 p. (rus)
11. Ammosov F.A., Roytman M.Ya., Tarasov-Agalkov N.A. *Protivopozharnaya zashchita besfonarnykh zdaniy* [Fire protection for lampless buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1965. 126 p. (rus)
12. Meshman L.M., Tsarichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Yu. *Proektirovaniye vodyanykh i pennykh avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Design of water and foam automatic fire extinguishing installations]. Moscow: VNIPO MChS RF, 2002. 413 p. (rus)
13. Ivanov E.N. Raschet intensivnosti orosheniya [Irrigation intensity calculation]. *Sbornik TsNIPO. Pozharnaya profilaktika i pozharotushenie*, 1964. No. 1. Moscow: Stroyizdat. Pp. 52–58. (rus)
14. Baburin V.V., Baburov V.P., Polyakov D.V., Lebedeva M.I. Otsenka effektivnosti sprinklernykh orositeley [Assessing of effectiveness of sprinklers]. *Technology of Technosphere Safety*, 2012. Vol. 44, No. 4. 6 p. (rus) URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-4/05-04-12.ttb.pdf>.
15. Wass Jr., Harold S., Fleming P.E., Russell P. *Sprinkler Hydraulics. A Guide to Fire System. Hydraulic Calculations*. Third Edition. The Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 2020. 291 p.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.81>

УДК 614.842.615

НАУЧНО-ОБОСНОВАННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВУ И ТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ УСТАНОВОК ГЕНЕРИРОВАНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ И МЕТОДИКА ИХ ИСПЫТАНИЙ

Навроцкий О.Д., Камлюк А.Н., Грачулин А.В., Лихоманов А.О.,
Скорупич И.С., Гусаров И.С., Полочанин Н.С.

Цель. Сформулировать научно-обоснованные требования к устройству и техническим характеристикам установок генерирования компрессионной пены и разработать методику их испытаний.

Методы. Теоретический анализ, технический осмотр, натурные испытания.

Результаты. В результате проведенной научно-исследовательской работы совместно с ОАО «Управляющая компания холдинга "Минский моторный завод"» разработан и изготовлен экспериментальный образец установки генерирования компрессионной пены. Сформулированы научно-обоснованные требования к устройству и техническим характеристикам такой установки. Определено, что экспериментальный образец установки генерирования компрессионной пены обеспечивает работу в следующих основных режимах: подача воды на тушение пожара; подача раствора смачивателя на тушение пожара; подача компрессионной пены на тушение пожара.

Область применения исследований. Сформулированные научно-обоснованные требования к устройству и техническим характеристикам установки генерирования компрессионной пены и разработанная методика ее испытаний будут использованы в технических условиях при производстве на ОАО «Управляющая компания холдинга "Минский моторный завод"», а также других предприятиях.

Ключевые слова: установка генерирования компрессионной пены, тушение пожара, компрессионная пена, технические характеристики, пенообразователь.

(Поступила в редакцию 12 января 2021 г.)

Введение

Наиболее распространенным средством тушения пожаров твердых веществ и материалов (пожаров класса А) является вода, т.к. она имеет высокие показатели теплоты парообразования, теплоемкости и низкую теплопроводность. Основным механизмом огнетушащего действия воды – охлаждение горючего вещества ниже температуры воспламенения. Кроме того, при поглощении тепла и переходе воды в пар он препятствует поступлению кислорода к горящему материалу.

Из-за высокого поверхностного натяжения вода обладает низкой смачивающей способностью, вследствие чего быстро стекает с горящих объектов, и значительная часть ее не участвует в процессе тушения. При использовании обычных пожарных стволов, формирующих компактную струю, эффективный расход воды при тушении пожаров класса А составляет не более 10–20 %. В связи с этим приходится увеличивать интенсивность подачи и расход воды в процессе тушения.

Возможности повышения огнетушащей эффективности воды могут быть связаны с обоснованным выбором оптимальной дисперсности распыленных струй воды, снижения поверхностного натяжения, повышения смачивающей способности. Этого можно достичь несколькими способами, в том числе использованием пенообразователей на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ) для получения пены низкой кратности. За рубежом для тушения пожаров твердых веществ и материалов используют специальные пенообразователи (class A foam, пенообразователи класса WA¹), рабочая концентрация которых составляет 0,3–1,0 %, что в 6–20 раз ниже концентрации обычных пенообразователей, используемых для тушения пожаров горючих и легковоспламеняющихся жидкостей.

¹ Государственный стандарт Республики Беларусь. Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Введ. 12.07.16. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2016. – 18 с.

В настоящее время для получения воздушно-механической пены низкой кратности используют стволы воздушно-пенные, пенные оросители, стволы высокого давления с пенным насадком, генераторы пены низкой кратности, стволы многофункциональные ручные и лафетные с соответствующими приспособлениями [1]. Основным механизмом действия указанных приборов является эжекция атмосферного воздуха в поток водного раствора пенообразователя при нормальном давлении и последующее образование пены.

Альтернативным способом получения пены является принудительное введение воздуха в раствор пенообразователя с помощью компрессора. За рубежом такие системы называются *compressed air foam systems* или *CAFS* (в переводе с англ. – устройства генерирования компрессионной пены, сокращено УГКП) и в последнее время получили широкое распространение [2–9].

Современные УГКП представляют собой комбинированные устройства, состоящие из трех основных элементов: пожарного насоса, воздушного компрессора и системы дозирования пенообразователя. Пенообразователь, воздух и вода смешиваются непосредственно в системе. В результате образуется однородная пена высокого качества, которая подается по рукавам к месту пожара. Управляет процессом смешения специальное устройство – контроллер системы дозирования пенообразователя. С помощью контроллера задается концентрация пенообразователя, которая поддерживается в автоматическом режиме.

Анализ результатов исследований зарубежных авторов позволил установить, что технология тушения компрессионной пеной с помощью УГКП имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными технологиями тушения пожаров [2–9]:

- вес рукавной линии составляет около 50 % веса стандартного рукава с чистой водой либо раствором пенообразователя (смачивателя), что экономит силы пожарных. Низкий вес рукава с компрессионной пеной позволяет ствольщику быстро маневрировать, выбирая наилучшую позицию для атаки и не затрачивая при этом больших физических усилий. Данное качество особо востребовано при тушении широкого фронта пожаров, в том числе лесных;

- значительно сокращается количество воды, требуемое для тушения пожаров, и, как следствие, снижается косвенный ущерб от пролитой воды. Небольшое количество воды в растворе пенообразователя и быстрая ликвидация пламенного горения значительно снижают парообразование, что существенно улучшает видимость при тушении, повышает точность тушения и снижает риск ожоговых травм пожарного;

- дальность подачи пены по сравнению с водой не уменьшается и при одинаковой величине расхода даже выше, чем у воды. Это связано с пневматическим действием пенного потока на выходе из сопла и более низким коэффициентом трения пены в рукавных линиях;

- поданная на стенки и потолки пена остается на месте и продолжает поглощать тепло от пожара, пока вся вода из пены не испарится;

- высота подачи компрессионной пены по рукавной линии и сухотрубам может достигать 250 м при нормальном давлении 0,7–1,0 МПа. Данная возможность обусловлена значительной разницей в весе пенного и водяного столба;

- при воздействии низких температур компрессионная пена промерзает по диаметру рукава на глубину 7–10 мм. Замерзший слой образует настовую корочку, обладающую отличным теплоизолирующим эффектом, в результате чего значительно увеличивается время на дальнейшее промерзание сердцевины рукава. Таким образом, рукав восстанавливает работоспособность без дополнительных действий. Достаточно открыть подачу компрессионной пены в обычном режиме, и замерзший слой пены разрушается и ликвидируется через открытый ручной ствол. Для того чтобы быстро восстановить работу полностью промерзшего рукава, необходимо деформировать структуру замерзшей пены путем протоптывания рукава и дальнейшей подачи компрессионной пены через ручной ствол.

УГКП постепенно появляются на вооружении в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, где названы пеногенерирующими системами со сжатым воздухом (ПССВ) [10–12]. К сожалению, ряд недостатков, имеющихся у первых отечественных ПССВ (относительно большая масса и габариты, а также неоптимизированное по кратности генерируемой пены насосное оборудование) не позволили широко применять данное устройство в подразделениях по чрезвычайным ситуациям. По этой причине формулировка научно-обоснованных требований к устройству и техническим характеристикам УГКП, а также разработка методики их испытаний являются актуальными задачами.

Основная часть

Определение технических требований к УГКП. Анализ известных конструкций УГКП, а также результаты исследований технических характеристик и испытаний таких установок, проведенных в Университете гражданской защиты МЧС Беларуси, а также за рубежом [2–12], позволили сформулировать основные требования к разрабатываемому экспериментальному образцу УГКП:

1. В конструкции УГКП необходимо предусмотреть следующие основные элементы: двигатель внутреннего сгорания, электрогенератор, аккумулятор, пожарный одноступенчатый центробежный насос, воздушный компрессор, насос для пенообразователя, систему для забора воды. При этом в целях повышения мобильности опытной установки и возможности ее подключения к пожарным автоцистернам в полевых условиях (для заправки установки огнетушащими веществами) при проведении испытаний целесообразно смонтировать агрегаты опытного образца УГКП на базе прицепного шасси.

2. Экспериментальный образец УГКП необходимо комплектовать агрегатами малой мощности (насос, пеносмеситель, двигатель и т.д.). Это обусловлено функциональным назначением экспериментального образца, на котором планируется отработать технологию смешивания огнетушащих веществ и их подачи в очаг пожара. Изначальное изготовление УГКП с агрегатами повышенной мощности приведет к экономически необоснованным расходам на огнетушащие вещества и горюче-смазочные материалы. Кроме того, потребуется большее число персонала для обслуживания УГКП в ходе испытаний.

3. В конструкции разрабатываемого экспериментального образца УГКП необходимо использовать унифицированные конструктивные решения, которые можно будет применять при проектировании УГКП с расположением на пожарной автоцистерне с приводом всех агрегатов от двигателя автомобиля через коробку отбора мощности.

4. С учетом концепции универсальности установок УГКП, сформированной в результате опытной эксплуатации за рубежом, в экспериментальном образце УГКП необходимо предусмотреть отдельный выход сжатого воздуха из компрессора для привода пожарного аварийно-спасательного инструмента либо иных пневматических инструментов.

5. УГКП должна обеспечивать работу в следующих основных режимах:

- подачи воды;
- подачи раствора пенообразователя (смачивателя);
- подачи компрессионной пены;
- подачи сжатого воздуха для привода пневматического инструмента и оборудования.

6. УГКП должна включать следующие сборочные единицы, узлы и комплектующие:

- базовое шасси – одноосный прицеп;
- модуль с УГКП (включающий двигатель внутреннего сгорания, электрогенератор, аккумулятор, пожарный одноступенчатый центробежный насос, воздушный компрессор, насос для пенообразователя).

7. Основные параметры УГКП должны соответствовать приведенным в таблице 1 и обеспечиваться при температуре окружающего воздуха 293 К (+20 °С) и атмосферном давлении 0,1 МПа (760 мм рт. ст.).

8. УГКП на прицепном шасси должна иметь отсек для пожарно-технического вооружения (ПТВ) с объемом, достаточным для размещения:

- пожарные напорные рукава с внутренним диаметром 51 мм – 2 шт.;
- ручной пожарный ствол с присоединительной головкой диаметром 66 мм и диаметром насадка 19 мм – 1 шт.
- пожарная переходная головка с 51 на 66 мм – 1 шт.

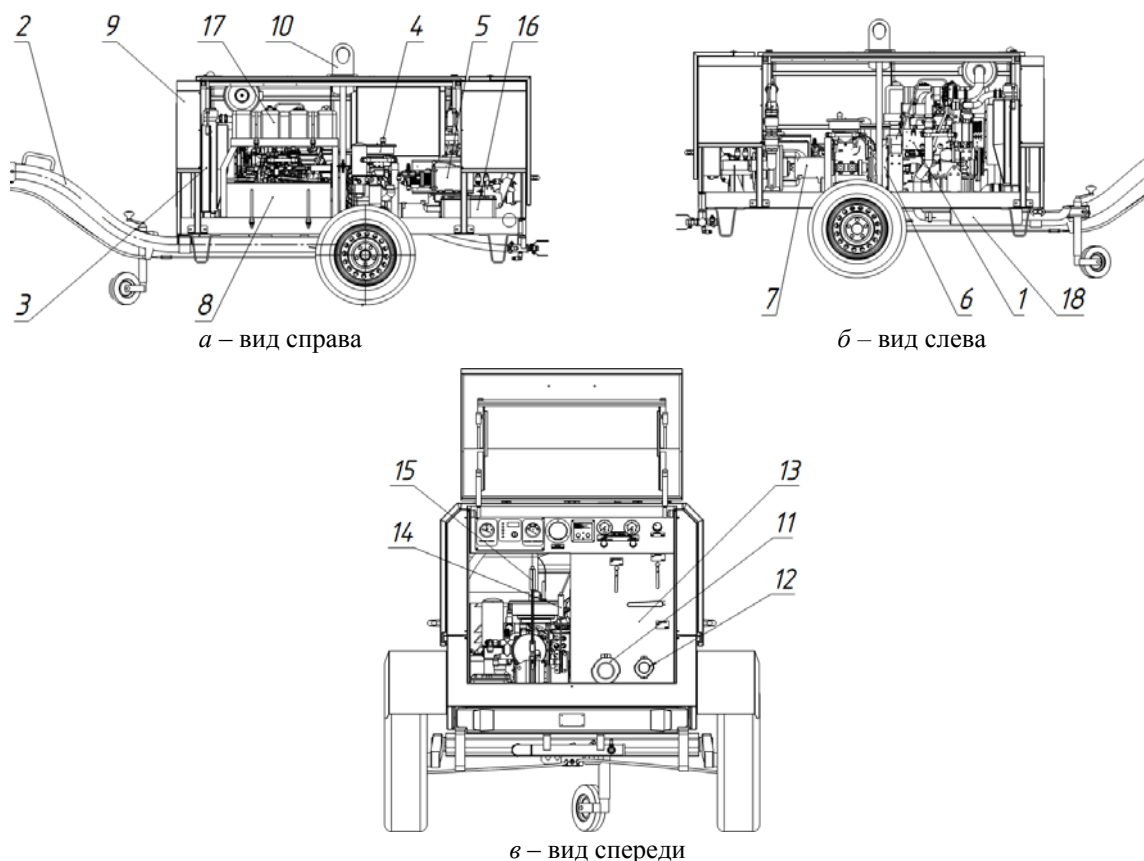
С учетом указанных требований в ходе опытно-конструкторских работ Университетом гражданской защиты МЧС Беларуси совместно с ОАО «Управляющая компания холдинга "Минский моторный завод"» был разработан экспериментальный образец УГКП 2/8-50 (П) ТУ ВУ 192695026.010-2020. Внешний вид УГКП приведен на рисунке 1, схема расположения основных узлов УГКП приведена на рисунке 2.

Таблица 1. – Требования к параметрам УГКП

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя
1	Номинальная производительность, не менее:	
1.1	компрессора (по воздуху), м ³ /мин	2
1.2	насоса (по воде), л/мин	600
1.3	насоса-дозатора (по пенообразователю), л/мин	4,5
2	Номинальное избыточное давление, не менее:	
2.1	компрессора, МПа	0,6–0,8
2.2	насоса, МПа	0,6
2.3	насоса-дозатора, МПа	2,0
3	Производительность установки по пене, л/м, не менее	1200
4	Рабочее (синхронизированное) давление установки, МПа	0,4–0,8
5	Кратность генерируемой пены, не менее	4
6	Номинальная геометрическая высота всасывания, м	1,5
7	Максимальная геометрическая высота всасывания, м, не менее	5
8	Время (длительность) всасывания с максимальной геометрической высоты всасывания, с, не более	40
9	Давление на входе в компрессор, МПа	0,1
10	Максимальное рабочее давление на входе в насос, МПа	0,6
11	Максимальное рабочее давление на выходе из насоса, МПа	1,0
12	Температура воздуха на выходе из компрессора (в нагнетательном патрубке), К (°C), не более	391 (118)
13	Расход масла компрессора (унос с воздухом), г/м ³ , не более	0,003
14	Условный диаметр всасывающего патрубка, мм	80
15	Количество напорных патрубков для подачи огнетушащего вещества (условный диаметр, мм)	1 (50)
16	Количество раздаточных вентилей сжатого воздуха	1
17	Номинальная частота вращения вала двигателя, об/мин, не более	3000
18	Давление масла в системе смазки двигателя при эксплуатационной мощности, МПа	0,25–0,35
19	Температура жидкости в системе охлаждения двигателя, К (°C), не более	373 (100)
20	Удельный расход топлива на режиме эксплуатационной мощности, г/кВт·ч, не более	258
21	Уровень звука в рабочей зоне оператора, дБ, не более	95
22	Габаритные размеры, м, не более: длина (с тормозом наката) ширина высота	3100 (4000) 1650 1800
23	Эксплуатационная масса установки, кг, не более	1800



Рисунок 1. – Внешний вид УГКП 2/8-50



- 1 – двигатель MMZ-3LDT; 2 – шасси; 3 – блок охлаждения; 4 – винтовой компрессорный модуль EVO3-NK; 5 – дозировочная система пены АДС-6; 6 – сцепление в сборе; 7 – центробежный насос 1KM80-50-200; 8 – бак топливный; 9 – кожух; 10 – стойка подъема; 11 – всасывающий патрубок центробежного насоса; 12 – напорный патрубок центробежного насоса; 13 – пульт управления УГКП; 14 – рычаг управления оборотами двигателя; 15 – рычаг включения сцепления; 16 – батарея аккумуляторная; 17 – бак для пенообразователя; 18 – труба выхлопная с глушителем

Рисунок 2. – Основные узлы УГКП 2/8-50

Методика испытаний УГКП. При выполнении измерений рекомендуется применять средства измерений, устройства и вещества, приведенные в таблице 2. Допускается применение другого оборудования и приборов аналогичного типа и класса. Измерения при проведении испытаний УГКП проводят методами непосредственных и косвенных измерений.

Таблица 2. – Применяемые средства измерений, устройства и вещества

Наименование средств измерения	Наименования измеряемых физических величин	Класс точности, погрешность
Барометр aneroid	80–106 кПа	± 2 кПа
Гигрометр-термометр цифровой	10–100 %	± 3 %
Термометр ртутный	-30 ± 70 °C	2
Весы	0,4–15,0 т на платформу	± 20 кг
Весы	0–500 кг	± 4 кг
Секундомер	0–30 мин	2
Рулетка	0–10000 мм	3
Линейка металлическая	0–1 м	2
Анемометр крыльчатый	0,3–5,0 м/с	$\pm (0,1 + 0,05 \times V_{изм})$ м/с
Расходомер электромагнитный	1,25–250,00 м³/ч	± 1 %
Динамометр	0–980 Н	± 5 Н
Емкость	$0,20 \pm 0,01$ м³	–
Мерный цилиндр ГОСТ 1770	$0,1–2,0$ дм³	–
Огнетушащий пенообразующий состав ОПС-0,4 по ТУ ВУ 101114857.061-2007	–	–
Ручной пожарный ствол с присоединительной головкой диаметром 66 мм и диаметром насадка 19 мм по СТБ 11.13.14	–	–

При выполнении измерений и испытаний должны соблюдаться следующие условия:

- температура окружающего воздуха, °C 0...+30;
- температура воды, °C 10...+25;
- относительная влажность воздуха, % 40...95;
- атмосферное давление, кПа 84...100;
- скорость ветра, м/с 0...5.

Методика испытаний УГКП включает следующие этапы:

1. Проверка полной массы.
2. Проверка специальных агрегатов подачи огнетушащих средств:
 - 2.1. Проверка параметров емкости (бака) для пенообразователя.
 - 2.2. Проверка параметров насосной установки:
 - проверка геометрической высоты всасывания;
 - определение интенсивности подачи воды;
 - проверка производительности подачи насоса-дозатора пенообразователя;
 - проверка насоса-дозатора пенообразователя в автоматическом режиме;
 - определение подачи пены;
 - определение кратности пены.

Проверку полной массы проводят с помощью весов. При испытаниях УГКП определяются полная масса и распределение полной массы через шины правой и левой колеи. Проверка массы (взвешивание) производится на весах, установленных на ровной горизонтальной площадке, при неработающем двигателе, закрытых дверях отсеков. Полная масса (с полной заправкой топливом и комплектацией) должна соответствовать п. 23 таблицы 1, а допустимое отклонение распределения нагрузки на колеса правого и левого бортов от фактической полной массы не должно превышать 3 %.

При определении вместимости бака прицеп необходимо установить на ровную поверхность, полностью слить пенообразователь из емкости. Проверка вместимости бака для пенообразователя проводится путем его заполнения с помощью мерного сосуда. Для этого пенообразователь заливается в мерный сосуд и затем из мерного сосуда переливается в емкость. Операция повторяется до полного заполнения бака (до начала перелива через заливное отверстие). Вместимость емкости принимается равной объему пенообразователя, залитого с помощью мерного сосуда. Вместимость бака для пенообразователя должна быть не менее 40 л.

Проверка геометрической высоты всасывания с помощью УГКП в номинальном режиме осуществляется с помощью заглубленной емкости (колодец), секундомера и рулетки в следующем порядке. Устанавливают УГКП рядом с заглубленной емкостью. Подключают ко всасывающей линии УГКП напорно-всасывающий рукав (рукава). На конце рукава устанавливают всасывающую сетку с обратным клапаном. Конец рукава с сеткой погружают в заглубленную емкость. Измеряют геометрическую высоту от всасывающего патрубка УГКП до поверхности воды в емкости. Геометрическая высота должна быть 4,8–5,0 м. Запускают двигатель привода УГКП, устанавливают частоту вращения вала двигателя 2700–3000 об/мин, с помощью сцепления приводят в действие пожарный насос и компрессор. С помощью сжатого воздуха и эжекционного газоструйного насоса засасывают воду в полость пожарного насоса. После заполнения пожарного насоса вода под давлением выбрасывается из подающего напорного патрубка УГКП. Время начала подачи воды из напорного патрубка должно быть не более 40 сек. с момента включения газоструйного насоса.

Определение подачи воды с помощью УГКП в номинальном режиме осуществляется с помощью емкости, манометра и секундомера в следующем порядке. Подключают к подающему напорному патрубку УГКП рукавную линию, состоящую из одного пожарного рукава диаметром 51 мм длиной 20 ± 1 м. На конце рукавной линии ствол не устанавливают, воду подают в канализацию. Забор воды осуществляют из мерной емкости объемом не менее 1000 л с помощью напорно-всасывающего рукава. Запускают двигатель привода УГКП, устанавливают давление на насосе 0,6 МПа и затем приступают к подаче воды в рукавную линию. Подачу воды производят в течение 60 ± 5 с. Измеряют объем поданной воды. Подача воды рассчитывается следующим образом:

$$Q_B = V_B / t_B, \quad (1)$$

где Q_B – подача воды насосной установкой, л/мин; V_B – объем воды, забранной из мерной емкости, л; t_B – время забора воды из емкости, мин.

Насос-дозатор УГКП должен обеспечивать концентрацию пенообразователя в растворе в диапазоне от 0,1 до 1,0 об. %, %. Проверка производительности насоса-дозатора пенообразователя в ручном режиме при частоте вращения вала двигателя 2700–3000 об/мин осуществляется с помощью мерной емкости для пенообразователя и секундомера в следующем порядке. Запускают двигатель привода УГКП. Включают насос-дозатор пенообразователя для работы в ручном режиме, индикатор должен светиться оранжевым цветом. С помощью рукоятки устанавливают максимальную подачу пенообразователя. Из напорного патрубка УГКП подается пенообразователь. После установления равномерного потока пенообразователя включаем секундомер и собираем пенообразователь в мерную емкость. Подача пенообразователя производится в течение 60 ± 5 с. Подача пенообразователя рассчитывается следующим образом:

$$Q_n = V_n / t_n, \quad (2)$$

где Q_n – подача пенообразователя, л/мин; V_n – объем пенообразователя в мерной емкости, л; t_n – время подачи пенообразователя, мин.

Проверка насоса-дозатора пенообразователя в автоматическом режиме осуществляется с помощью мерной емкости для воды объемом не менее 1000 л и мерного цилиндра для пенообразователя. Заполняют бак для пенообразователя до начала перелива через заливное отверстие. Подключают к подающему напорному патрубку УГКП рукавную линию, состоящую из одного пожарного рукава диаметром 51 мм длиной 20 ± 1 м. На конце рукавной линии устанавливают ручной пожарный ствол с присоединительной головкой диаметром 66 мм и диаметром насадка 19 мм, воду подают в канализацию. Забор воды осуществляют из мерной емкости объемом не менее 1000 л с помощью напорно-всасывающего рукава. Перекрывают кран подачи воды в подающий напорный патрубок. Запускают двигатель привода УГКП, устанавливают давление на насосе 0,6 МПа. Включают насос-дозатор пенообразователя для работы в автоматическом режиме, индикатор должен светиться зеленым цветом. С помощью рукоятки устанавливают подачу пенообразователя на 1 %. Затем приступают к подаче пены в рукавную линию, для чего открывают кран на подающем напорном патрубке. Подачу пены производят в течение 60 ± 5 с. Измеряют объем израсходованной воды и пенообразователя. Объем поданного пенообразователя определяют путем заполнения бака для пенообразователя с помощью мерного сосуда до начала перелива. Определяют концентрацию пенообразователя по формуле:

$$C = V_n / V_v, \quad (3)$$

где C – концентрация пенообразователя, об. %, V_n – объем израсходованного пенообразователя, л; V_v – объем израсходованной воды, л.

Определение производительности УГКП по пене в номинальном режиме осуществляется с помощью мерной емкости и секундомера. Подключают к подающему напорному патрубку УГКП рукавную линию, состоящую из двух пожарных рукавов диаметром 51 мм длиной 20 ± 1 м. На конце рукавной линии устанавливают ствол. Забор воды осуществляют из емкости объемом не менее 1 м^3 с помощью напорно-всасывающего рукава. Запускают двигатель привода УГКП, устанавливают давление на насосе 0,6 МПа. Включают насос-дозатор пенообразователя для работы в автоматическом режиме, индикатор должен светиться зеленым цветом. С помощью рукоятки устанавливают подачу пенообразователя на 1 %. Затем приступают к подаче воды в рукавную линию, для чего открывают кран на подающем напорном патрубке. Далее включают подачу сжатого воздуха от компрессора УГКП. Через 10–20 с от начала установившегося режима работы установки приступают к заполнению мерной емкости пеной. Подача рассчитывается следующим образом:

$$Q_{\text{пена}} = V / t, \quad (4)$$

где $Q_{\text{пена}}$ – подача насосной установки по пене, л/мин; V – объем мерной емкости, л; t – время заполнения мерной емкости пеной, мин.

Определение кратности пены, получаемой с помощью УГКП, в номинальном режиме осуществляется с помощью мерной емкости и весов. Подключают к подающему напорному патрубку УГКП рукавную линию, состоящую из двух пожарных рукавов диаметром 51 мм длиной 20 ± 1 м. На конце рукавной линии устанавливают ствол. Забор воды осуществляют из емкости объемом не менее 1 м^3 с помощью напорно-всасывающего рукава. Запускают

двигатель привода УГКП, устанавливают давление на насосе 0,6 МПа. Включают насос-дозатор пенообразователя для работы в автоматическом режиме, при этом индикатор должен светиться зеленым цветом. С помощью рукоятки устанавливают подачу пенообразователя на 1 %. Затем приступают к подаче воды в рукавную линию, для чего открывают кран на подающем напорном патрубке. Далее включают подачу сжатого воздуха от компрессора УГКП. Через 10–20 с от начала установившегося режима работы установки приступают к заполнению мерной емкости пеной. После определяют массу емкости, заполненной пеной. Кратность пены K рассчитывают по формуле:

$$K = V_{\text{пена}} / V_{\text{п}} , \quad (5)$$

где $V_{\text{пена}}$ – объем пены, дм^3 ; $V_{\text{п}}$ – объем поданного раствора пенообразователя, дм^3 .

В соответствии с п. 5 таблицы 1 кратность пены должна быть не менее 4. Проводят не менее трех измерений. За результат принимают среднее арифметическое результатов трех испытаний.

Проверку геометрических размеров и параметров проходимости прицепа проводят с помощью рулетки, линейки. При испытаниях определяются следующие размерные параметры:

- габаритные размеры прицепа (длина, ширина, высота);
- дорожный просвет (расстояние между опорной поверхностью и самой нижней точкой центральной части автомобиля).

Значения измеряемых размерных параметров должны соответствовать указанным в п. 22 таблицы 1, при этом дорожный просвет должен быть не менее 200 мм.

Заключение

На основе анализа известных конструкций УГКП и результатов исследований технических характеристик и испытаний таких установок, проведенных в Университете гражданской защиты МЧС Беларуси, а также за рубежом [2–12], сформулированы основные требования к устройству и техническим характеристикам УГКП и разработана методика их испытаний. В соответствии с данной методикой проведены испытания экспериментального образца УГКП 2/8-50, разработанного в ходе опытно-конструкторских работ Университетом гражданской защиты МЧС Беларуси совместно с ОАО «Управляющая компания холдинга "Минский моторный завод"».

Испытания УГКП проводились на территории Университета гражданской защиты МЧС Беларуси при следующих условиях окружающей среды:

- | | |
|---------------------------------------|---------------|
| – температура окружающего воздуха, °С | +18...+25; |
| – температура воды, °С | +15...+18; |
| – атмосферное давление, кПа | 90,7...101,8; |
| – относительная влажность, % | 55...85; |
| – скорость ветра, м/с | 0...1,5. |

При проведении испытаний выявлены следующие особенности УГКП 2/8-50, которые рекомендуется учитывать при совершенствовании конструкции:

- установить дополнительный манометр после перекрывного вентиля для измерения давления воды в рукавной линии;
- использовать для комплектации УГКП пожарный насос с номинальным избыточным давлением 0,8 МПа при частоте вращения вала двигателя 2700–3000 об/мин;
- установить во всасывающую полость насоса вакуумметр для контроля разряжения, создаваемого эжекционным газоструйным насосом;
- обеспечить синхронизацию давлений воды и воздуха во всех диапазонах;
- доработать функцию забора пенообразователя из посторонней емкости;
- учитывать, что промывка насоса-дозатора подачей воды от пожарного насоса приводит к попаданию воды в бак пенообразователя;
- установить освещение в отсеке управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 224 с.

2. Carey, W.M. National class A foam research project technical report: Structural fire fighting-room burn tests phase II / W.M. Carey // National Fire Protection Research Foundation. – Quincy, Massachusetts, USA. – 1994.
3. Colletti, D.J. Class A foam for structure firefighting / D.J. Colletti // Fire Engineering. – 1992. – Vol. 145, No. 7. – P. 47–56.
4. Liebson, J. Introduction to class A foams and compressed air foam systems for the structural fire service / J. Liebson // MA: International Society of Fire Service Instructors. – 1991. – 45 p.
5. Colletti, D.J. Compressed air foam systems and fire hose / D.J. Colletti // Fire Engineering. – 1996. – Vol. 149. – P. 50–52.
6. Murdock, J.I. Compressed air foam systems: A project pertaining to an adoption decision. (Executive Development Research Paper) / J.I. Murdock // Emmitsburg, MD: National Fire Academy. – 1997.
7. Taylor, R.G. Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions / R.G. Taylor. – Morristown, New Jersey, 1998. – P. 75–112.
8. Colletti, D.J. Testing CAFS in live burns / D.J. Colletti // Fire Engineering. – 1994. – Vol. 147. – P. 74–76.
9. Fornell, D.P. Fire stream management handbook / D.P. Fornell. – Fire Engineering Books, 1991. – 448 p.
10. Навроцкий, О.Д. Пеногенерирующие системы со сжатым воздухом – средство пенного пожаротушения нового поколения / О.Д. Навроцкий, Ю.В. Заневская, В.К. Емельянов, А.Н. Камлюк, И.В. Карпенчук, А.В. Грачулин // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 1 (15). – С. 22–31.
11. Камлюк, А.Н. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом / А.Н. Камлюк, О.Д. Навроцкий, А.В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 44–53. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-1.44.
12. Камлюк, А.Н. Особенности применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 168–175. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.168.

Научно-обоснованные требования к устройству и техническим характеристикам установок генерирования компрессионной пены и методика их испытаний

Science-based requirements for the design and technical characteristics of the compressed air foam generating systems and their testing technique

Навроцкий Олег Дмитриевич

кандидат технических наук

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

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

e-mail: onav@tut.by

ORCID: 0000-0002-4137-2519

Oleg D. Navrotskiy

PhD in Technical Sciences

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

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

e-mail: onav@tut.by

ORCID: 0000-0002-4137-2519

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

e-mail: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physics and Mathematics 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

e-mail: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

Грачулин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент

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

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

e-mail: Grachulin@ucp.by

ORCID: 0000-0003-3832-8258

Aleksandr V. Grachulin

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

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

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

e-mail: Grachulin@ucp.by

ORCID: 0000-0003-3832-8258

Лихоманов Алексей Олегович

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

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

e-mail: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

Aleksey O. Likhomanov

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

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

e-mail: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

Скорупич Илья Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
руководящих кадров, магистрант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: skorupich97@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0523-7261

Il'ya S. Skorupich

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Administration Training Faculty,
Graduate Student

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: skorupich97@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0523-7261

Гусаров Игорь Сергеевич

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: igor.gusarov.2000@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0665-8212

Igor' S. Gusarov

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

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: igor.gusarov.2000@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0665-8212

Полочанин Никита Сергеевич

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: nik.polochanin@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6066-4683

Nikita S. Polochanin

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

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: nik.polochanin@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6066-4683

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.81>

SCIENCE-BASED REQUIREMENTS FOR THE DESIGN AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE COMPRESSED AIR FOAM GENERATING SYSTEMS AND THEIR TESTING TECHNIQUE

Navrotskiy O.D., Kamlyuk A.N., Grachulin A.V., Likhomanov A.O., Skorupich I.S.,
Gusarov I.S., Polochanin N.S.

Purpose. To formulate science-based requirements for the design and technical characteristics of the compressed air foam generating systems and develop their testing technique.

Methods. Theoretical analysis, technical inspection, field tests.

Findings. As a result of the research work carried out jointly with the Open Joint Stock Company «MINSK MOTOR PLANT» Holding Managing Company an experimental model of the compressed air foam generating system was developed and manufactured. Science-based requirements for the design and technical characteristics for this system have been formulated. It has been established that the experimental model of the compressed air foam generating system provides operation in the following basic modes: water supply for fire extinguishing; delivery of the wetting agent solution for fire extinguishing; compressed air foam supply for fire extinguishing; compressed air supply for operation of pneumatic rescue tools and equipment.

Application field of research. The formulated science-based requirements for the design and technical characteristics of the compressed air foam generating system and the developed testing technique will be used in technical specifications during production at the OJSC «MINSK MOTOR PLANT» Holding Managing Company as well as other enterprises.

Keywords: compressed air foam generating system, fire extinguishing, compressed air foam, technical characteristics, foaming agent.

(The date of submitting: January 12, 2021)

REFERENCES

1. 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)
2. Carey W.M. National class A foam research project technical report: Structural fire fighting-room burn tests phase II. National Fire Protection Research Foundation. Quincy, Massachusetts, USA. 1994.
3. Colletti D.J. Class A foam for structure firefighting. *Fire Engineering*, 1992. Vol. 145, No. 7. Pp. 47–56.
4. Liebson J. *Introduction to class A foams and compressed air foam systems for the structural fire service*. MA: International Society of Fire Service Instructors. 1991. 45 p.
5. Colletti D.J. Compressed air foam systems and fire hose. *Fire Engineering*, 1996. Vol. 149. Pp. 50–52.
6. Murdock J.I. Compressed air foam systems: A project pertaining to an adoption decision. (Executive Development Research Paper). Emmitsburg, MD: National Fire Academy. 1997.
7. Taylor R.G. Technical Report 98: Compressed air foam systems in limited staffing conditions. Morristown, New Jersey, 1998. Pp. 75–112.
8. Colletti D.J. Testing CAFS in live burns. *Fire Engineering*, 1994. Vol. 147. Pp. 74–76.
9. Fornell D.P. *Fire stream management handbook*. Fire Engineering, 1991. 448 p.
10. Navrotskiy O.D., Zanevskaya Yu.V., Emel'yanov V.K., Kamlyuk A.N., Karpenchuk I.V., Grachulin A.V. Penogeneriruyushchie sistemy so szhatym vozdukhom – sredstvo pennogo pozharotusheniya novogo pokoleniya [Foam generating systems with compressed air – new generation foam fire extinguishing agent]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2012. Vol. 15, No. 1. Pp. 22–31. (rus)
11. Kamlyuk A.N., Navrotskiy O.D., Grachulin A.V. Tushenie pozharov penogeneriruyushchimi sistemami so szhatym vozdukhom [Fire extinguishing by compressed air foam systems]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 1. Pp. 44–53. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-1.44.
12. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. Osobennosti primeneniya penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom dlya tusheniya pozharov [Particularities of extinguishing by compressed air foam systems]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 168–175. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.168.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.93>

УДК 614.841.334.2:517.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОБЛУЧЕННОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ МЕЖДУ ЗДАНИЯМИ С ДВУСКАТНЫМИ КРОВЛЯМИ, ВЫПОЛНЕННЫМИ ИЗ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

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

Цель. Разработать математическую модель оценки углового коэффициента облученности, учитывающую треугольную форму излучающей поверхности и взаимное расположение относительно принимающей поверхности.

Методы. Разработка уравнений для определения углового коэффициента облученности опиралась на результаты анализа экспериментальных исследований и существующих подходов к определению величины противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями, закон Ламберта для определения количества энергии, передаваемой от излучающей к принимающей поверхности.

Результаты. Для параллельных излучающей и принимающей поверхностей, размещенных произвольно относительно друг друга, получено аналитическое выражение, позволяющее определить угловой коэффициент облученности элемента принимающей поверхности излучающей поверхностью, имеющей форму произвольного многоугольника.

Область применения исследований. Определение величины противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями с учетом индивидуальных особенностей рассчитываемых объектов – двускатные кровли, выполненные из горючих материалов.

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

(Поступила в редакцию 26 января 2021 г.)

Введение

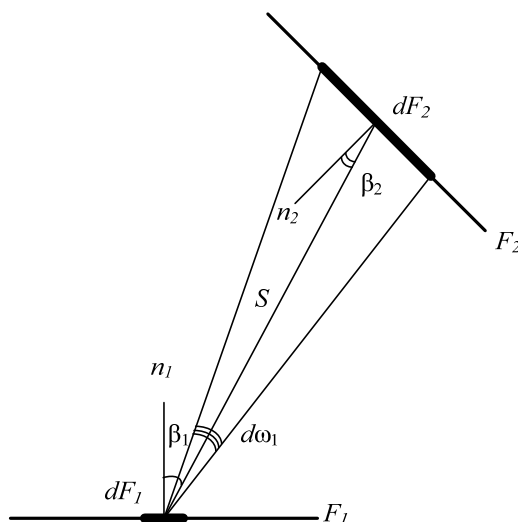
Наибольшую сложность при расчете лучистого теплообмена между двумя поверхностями представляет нахождение углового коэффициента облученности φ . Данный коэффициент показывает отношение потока излучения от поверхности одного тела на поверхность другого тела к полному потоку собственного излучения, выходящему со всей поверхности первого тела по возможным направлениям в пределах полусферического телесного угла, данный угол является частью пространства, ограниченного некоторой конической поверхностью. В качестве частных случаев телесного угла рассматривают трехгранные и многогранные углы [1; 2].

Таким образом, угловой коэффициент облученности φ представляет собой геометрический параметр, который зависит от формы и размера поверхностей, при этом данный коэффициент рассчитывают для приведенных поверхностей, у которых контур и геометрические размеры близки к реальным размерам пламени. Угловой коэффициент также зависит от взаимного расположения поверхностей в пространстве относительно друг друга (рис. 1) [3].

Из схемы, представленной на рисунке 1, следует, что принимающая F_1 и излучающая F_2 поверхности лежат на произвольно расположенных плоскостях, на расстоянии S между геометрическими центрами поверхностей, под углами β_1 и β_2 между отрезком, соединяющим эти центры, и нормальными n_1 и n_2 к поверхностям. При этом элемент dF_2 поверхности F_2 из геометрического центра элемента dF_1 поверхности F_1 виден под телесным углом $d\omega_1$ (рис. 1) [4].

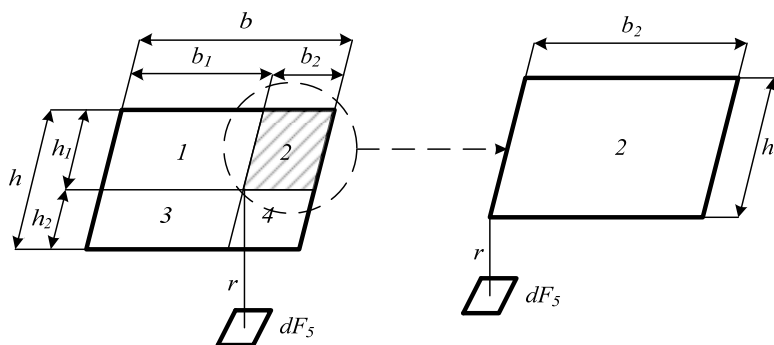
Сложность определения углового коэффициента облученности заключается в том, что излучающая поверхность по отношению к принимающей поверхности может располагаться под любым углом наклона и на любом расстоянии. В общем случае угловой коэффициент облученности элемента поверхности dF_1 поверхностью F_2 определяется по формуле [5–7]:

$$\varphi = \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{\pi S^2} dF_2. \quad (1)$$

Рисунок 1. – Схема лучистого теплообмена между поверхностями dF_1 и dF_2

Задача определения величины углового коэффициента облученности значительно упрощается, если телесный угол, под которым элемент dF_1 видит излучающую поверхность, в пересечении с параллельной элементу dF_2 поверхностью образует фигуру, состоящую из прямоугольников [8]. Принимая излучающую поверхность в виде прямоугольника, ряд методик [9–12] по определению противопожарных разрывов между зданиями упрощает расчет по определению углового коэффициента облученности. Однако тем самым они не учитывают индивидуальных особенностей зданий, что приводит к получению неточных значений, влияющих на суммарную плотность теплового потока. Таким образом, актуальной задачей является разработка математической модели определения углового коэффициента облученности, учитывающей различные формы излучающей поверхности и взаимное расположение объектов относительно друг друга.

Анализ методик. В существующих методиках по определению противопожарных разрывов присутствуют ограничения по выбору формы и размеров излучающей поверхности, что напрямую влияет на величину углового коэффициента облученности. В общем случае методики ТКП EN 1991-1-2¹, СТБ 11.05.03-2010², М.Я. Ройтмана [9], D. Drysdale [6], B. Karlsson и G.J. Quintiere [10], E. Carlsson [11] и В.Ф. Кудаленкина [12] рассматривают излучающую поверхность как прямоугольник (рис. 2), т.к. форма и размеры пламени в реальных условиях не являются постоянными величинами.



а – суммарный угловой коэффициент облученности от излучающей поверхности

б – частный случай углового коэффициента облученности от части излучающей поверхности

Рисунок 2. – Схема к определению углового коэффициента облученности от излучающей поверхности в виде прямоугольника

¹ Еврокод 1. Воздействие на конструкции. Часть 1-2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: ТКП EN 1991-1-2-2009. Введ. 01.01.10. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2010. – 48 с.

² Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03-2010. – Введ. 28.04.10. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2010. – 76 с.

Таким образом, излучающая поверхность разбивается на 4 прямоугольника [1], в зависимости от расположения геометрического центра принимающей поверхности, после чего определяется угловой коэффициент облученности от каждого прямоугольника (рис. 2б) на принимающую поверхность по формуле 2:

$$\varphi_{2-5} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{b_2}{\sqrt{r^2 + b_2^2}} \arctg \frac{h_1}{\sqrt{r^2 + b_2^2}} + \frac{h_1}{\sqrt{r^2 + h_1^2}} \arctg \frac{b_2}{\sqrt{r^2 + h_1^2}} \right), \quad (2)$$

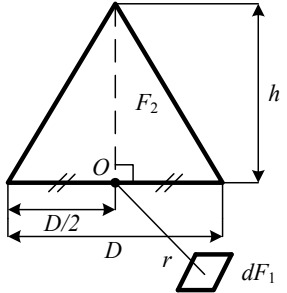
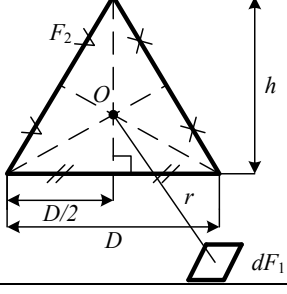
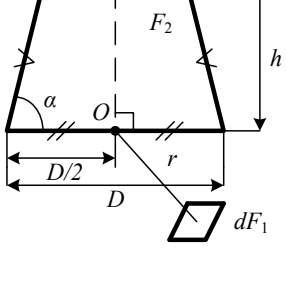
где b_2 – ширина второго прямоугольника (рис. 2б), м; h_1 – высота прямоугольника, м; r – расстояние между излучающей и принимающей поверхностями, м.

Суммарный угловой коэффициент облученности (рис. 2а) определяется по формуле 3 [9]:

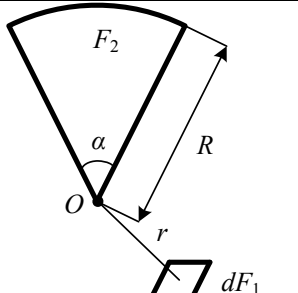
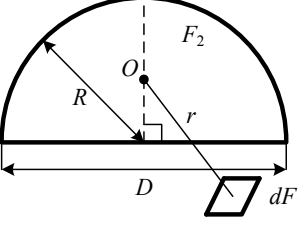
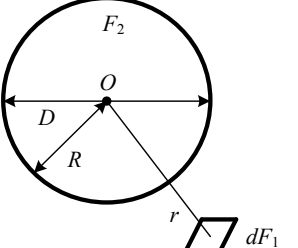
$$\varphi = \varphi_{1-5} + \varphi_{2-5} + \varphi_{3-5} + \varphi_{4-5}. \quad (3)$$

Анализ методик по определению плотности теплового потока при лучистом теплообмене показал, что в расчетах используют различные формы излучающей поверхности. Методики В. Karlsson и G.J. Quintiere [10] и В.Ф. Кудаленкина [12] позволяют рассчитывать угловой коэффициент облученности от излучающих площадок следующих форм: треугольник, трапеция, сектор, полукруг и круг. В таблице 1 приведен анализ форм и расчетные схемы по определению углового коэффициента облученности согласно существующим методикам [9–12].

Таблица 1. – Приведенные формы излучающих поверхностей

№ п/п	Форма и размещение излучающей поверхности	Описание и формула по определению углового коэффициента облученности
1		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – равнобедренный треугольник с основанием D (м) и высотой h (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена посередине основания D (точка O) [12]. $\varphi_{2-1} = \frac{hD}{\pi a} \left(\arctg \frac{2h^2}{a} + \arctg \frac{D^2}{2a} \right), \quad \text{где } a = \sqrt{4h^2r^2 + D^2r^2 + h^2D^2} \quad (4)$
2		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – равнобедренный треугольник с основанием D (м) и высотой h (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в геометрическом центре излучающей поверхности (точка O) [12]. $\varphi_{2-1} = \frac{2hD}{\pi a} \left(\arctg \frac{4h^2}{a} + \arctg \frac{3D^2 + 4h^2}{2a} \right) + \frac{h}{\pi \sqrt{9r^2 + h^2}} \arctg \frac{3D}{2\sqrt{9r^2 + h^2}}, \quad (5)$ где $a = \sqrt{36r^2h^2 + 9r^2D^2 + 4h^2D^2}$
3		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – равнобедренная трапеция с нижним основанием D (м) и высотой h (м). Боковая сторона и нижнее основание трапеции образуют угол α . Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена посередине основания D (точка O) [12]. $\varphi_{1-2} = \frac{h}{\pi a} \arctg \frac{D \operatorname{tg} \alpha - 2h}{a} + \frac{D \sin \alpha}{\pi b} \left(\arctg \frac{2h - D \sin \alpha \cos \alpha}{b \sin \alpha} + \arctg \frac{D \cos \alpha}{b} \right), \quad (6)$ где $a = \sqrt{r^2 + h^2}$, $b = \sqrt{4r^2 + D^2 \sin^2 \alpha}$

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Форма и размещение излучающей поверхности	Описание и формула по определению углового коэффициента облученности
4		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – сектор с центром точке O и центральным углом α (рад), ограниченный двумя радиусами R (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в точке O [12]. $\varphi_{1-2} = \frac{R^2 \alpha}{2\pi(r^2 + R^2)} \quad (7)$
5		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – полукруг с хордой D (м), равной двум радиусам R (м). Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в центре тяжести полукруга F_2 (точка O) [10]. $\varphi_{1-2} = \frac{0,738R^2}{r^2 + 1,18R^2} + \frac{0,135R}{a} \arctg \frac{R}{a}, \quad \text{где } a = \sqrt{r^2 + 0,181R^2} \quad (8)$
6		Излучающая F_2 и принимающая dF_1 поверхности параллельны и удалены на расстояние r (м) друг от друга. F_2 – круг с диаметром D, м. Проекция геометрического центра принимающей поверхности dF_1 расположена в центре круга F_2 (точка O) [11]. $\varphi_{1-2} = \frac{D^2}{4r^2 + D^2} \quad (9)$

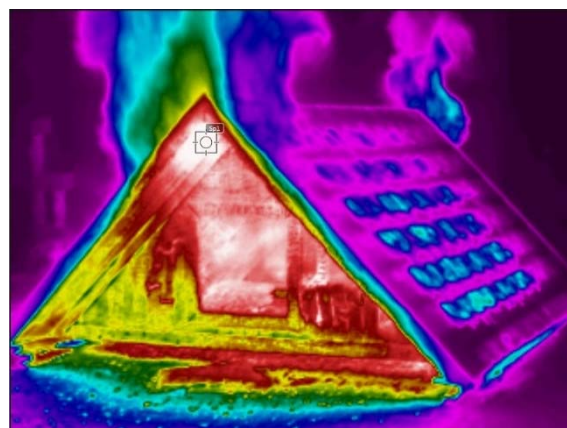
Анализ приведенных в таблице 1 форм излучающих поверхностей и зависимостей по определению углового коэффициента облученности показал следующие недостатки существующих методик [9–12]: рассматриваются только частные случаи, при условии, что проекция принимающей поверхности точно определена по отношению к излучающей поверхности; случаи, представленные в таблице 1, крайне редко встречаются ввиду индивидуальных особенностей каждого здания или сооружения [3].

Поскольку угловой коэффициент облученности является геометрическим параметром, при наличии универсальной математической модели от соответствующей формы излучающей поверхности становится возможным использовать данную модель в любой методике по определению противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями.

Одним из проблемных вопросов при расчете противопожарных разрывов между индивидуальными жилыми домами является определение углового коэффициента облученности от двускатной кровли, выполненной из горючих материалов. Существующие методики [9–12] позволяют определять данный параметр, принимая излучающую поверхность только в качестве прямоугольника, при этом ширина пламени принимается равной длине фасада, а высота – как геометрическая высота здания до конька крыши. Указанное допущение значительно увеличивает расчетную площадь излучающей поверхности.

С целью уточнения форм и размеров излучающей поверхности были проведены натурные экспериментальные исследования в соответствии с методикой [13]. При горении экспериментального фрагмента двускатной кровли, выполненного из горючих материалов, посредством тепловизионной съемки было установлено, что излучающая поверхность от фронтона двускатной кровли с размером в плане $1,5 \times 3$ м имеет форму треугольника, однако геометрические размеры излучающей поверхности, в частности высота, превышает значение высоты фронтона экспериментального фрагмента (рис. 3).

Для проведения сравнительного анализа величины углового коэффициента облученности и площади излучающей поверхности определялись по существующим методикам [9; 12], т.к. они позволяют рассчитывать критическую плотность теплового потока от кровель, выполненных из горючих материалов. Результаты расчетов приведены в таблице 2.



а – фото излучающей поверхности

б – тепловизионная съемка излучающей поверхности

Рисунок 3. – Фрагмент двускатной кровли на 17-й мин натурального эксперимента по определению геометрических параметров излучающей поверхности

Таблица 2. – Результаты расчета углового коэффициента облученности

№ п/п	Автор методики	Геометрические параметры излучающей поверхности	Площадь излучающей поверхности, S , m^2	Угловой коэффициент облученности, φ
1	М.Я. Ройтман [9]	Форма пламени приводится к прямоугольной форме (рис. 2): $b = 3$ м; $h = 1,5$ м. Расчет осуществляется по формуле (2)	4,5 m^2	0,080
2	В.Ф. Кудаленкин [12]	Форма пламени приводится к треугольной форме (поз. 2 табл. 1), $b = 3$ м; $h = 1,5$ м. Расчет осуществляется по формуле (5)	2,25 m^2	0,076

После обработки экспериментальных данных, полученных посредством тепловизионной съемки фронтона экспериментального образца, выяснилось, что максимальная фактическая площадь излучающей поверхности была достигнута на 17-й мин экспериментального исследования и составила 4,12 m^2 (рис. 4).

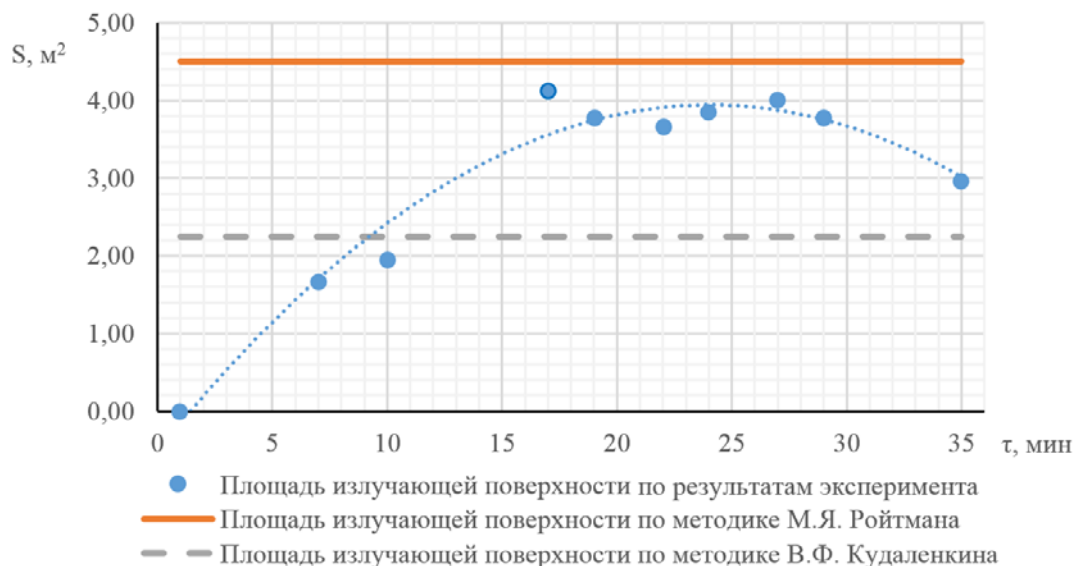


Рисунок 4. – Изменение площади излучающей поверхности при проведении экспериментальных исследований

При анализе полученных значений установлено, что при расчете по методике М.Я. Ройтмана [9] геометрические параметры излучающей поверхности и, как следствие, ее площадь (4,5 m^2) превышают реальные значения, полученные при проведении эксперимен-

тальных исследований ($4,12 \text{ м}^2$). Определение размеров излучающей поверхности по методике В.Ф. Кудаленкина [12] для зданий и сооружений с кровлями, выполненными из горючих материалов, происходит по аналогичным условиям, описанным ранее. Вместе с тем методика [12] позволяет определять угловой коэффициент облученности от излучающей поверхности в форме равнобедренного треугольника (поз. 1–2 табл. 1), однако в данной методике не предусмотрена вариативность взаимного расположения с принимающей поверхностью, а площадь излучающей поверхности принимается равной площади фасада ($2,25 \text{ м}^2$), что приводит к заниженным значениям по сравнению с экспериментальными данными ($4,12 \text{ м}^2$).

На основании вышеизложенного подтверждается актуальность разработки математической модели по определению углового коэффициента облученности, которая позволит рассчитывать излучающие поверхности различных форм с учетом их взаимного расположения относительно друг друга.

Построение модели. Для решения поставленной задачи были приняты следующие допущения:

- проекция принимающей поверхности на излучающую может располагаться не только в вершинах или геометрических центрах рассматриваемых фигур;
- излучающая поверхность может иметь различную форму, включая произвольный треугольник и трапецию.

Таким образом, была разработана универсальная схема взаимного расположения излучающей и принимающей поверхностей, ограниченная шестью линиями, которая позволяет рассчитать угловой коэффициент облученности от любого многоугольника (рис. 5).

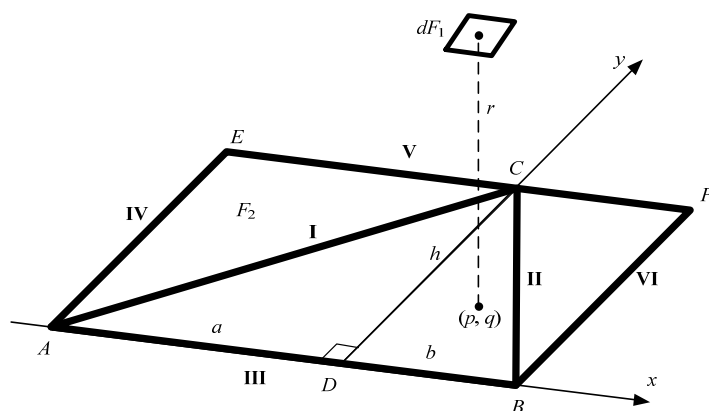


Рисунок 5. – Схема взаимного расположения излучающей и принимающей поверхностей

На примере произвольной треугольной излучающей поверхности рассмотрим вывод формулы по определению углового коэффициента облученности. В соответствии с принятыми допущениями имеем: излучающая поверхность – треугольник ACB , с основанием AB , высотой $CD = h$, проекциями боковых сторон на основание $AD = a$ и $DB = b$; центр проекции принимающей поверхности лежит в точке с координатами (p, q) ; начало координат совпадает с точкой D . Таким образом, отрезки I–III задаются формулами:

$$\text{I (AC): } y = h + \frac{h}{a}x, \text{ где } x \text{ изменяется от } -a \text{ до } 0; \quad (10)$$

$$\text{II (CB): } y = h - \frac{h}{b}x, \text{ где } x \text{ изменяется от } 0 \text{ до } b; \quad (11)$$

$$\text{III (BA): } y = 0, \text{ где } x \text{ изменяется от } b \text{ до } -a. \quad (12)$$

При этом точки имеют следующие координаты: $A(-a; 0)$, $B(b; 0)$, $C(0; h)$. После переноса начала координат в центр проекции принимающей поверхности с координатами (p, q) (рис. 6) формулы (10)–(13) примут вид:

$$\text{I (AC): } Y = h - q + \frac{h}{a} \cdot p + \frac{h}{a} \cdot X, \text{ где } X \text{ изменяется от } -a-p \text{ до } -p; \quad (13)$$

$$\text{II (CB): } Y = h - q - \frac{h}{b} \cdot p - \frac{h}{b} \cdot X, \text{ где } X \text{ изменяется от } -p \text{ до } b-p; \quad (14)$$

$$\text{III (BA): } Y = -q, \text{ где } X \text{ изменяется от } b-p \text{ до } -a-p. \quad (15)$$

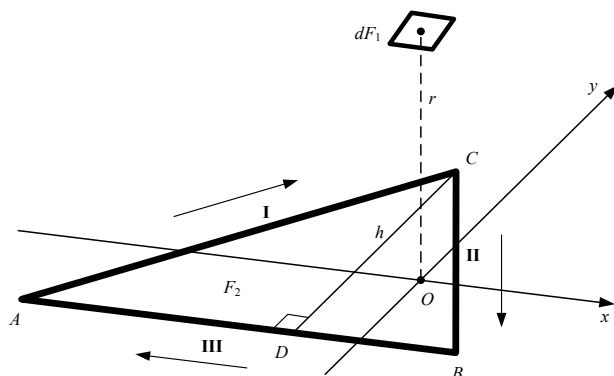


Рисунок 6. – Схема взаимного расположения излучающей и принимающей поверхностей при переносе точки начала координат

Для изображенного на рисунке 6 случая формула (1) перепишется в виде:

$$\varphi = \int_{F_1} \frac{\cos^2 \beta}{\pi S^2} dF_1 = \frac{1}{2\pi} \oint_L \frac{ydx - xdy}{S^2} = \left[S^2 = x^2 + y^2 + r^2 \right] = \frac{1}{2\pi} \oint_{I, II, III} \frac{ydx - xdy}{x^2 + y^2 + r^2}. \quad (16)$$

Подставив (13)–(15) в (16), путем несложных вычислений получим выражения для криволинейных интегралов на каждом из участков I–III:

$$\varphi_I = \frac{1}{2\pi} \frac{(a+p)h - aq}{D_I} \left(\arctg \frac{h^2 - qh - ap}{D_I} + \arctg \frac{a^2 - pa - qh}{D_I} \right), \quad (17)$$

$$\text{где } D_I = \sqrt{[(a+p)h - aq]^2 + (h^2 + a^2)r^2};$$

$$\varphi_{II} = \frac{1}{2\pi} \frac{(b-p)h - bq}{D_{II}} \left(\arctg \frac{h^2 - qh + bp}{D_{II}} + \arctg \frac{b^2 - pb + hq}{D_{II}} \right), \quad (18)$$

$$\text{где } D_{II} = \sqrt{[(b-p)h - bq]^2 + (h^2 + b^2)r^2};$$

$$\varphi_{III} = \frac{q}{2\pi\sqrt{q^2 + r^2}} \left(\arctg \frac{a+p}{\sqrt{q^2 + r^2}} + \arctg \frac{b-p}{\sqrt{q^2 + r^2}} \right). \quad (19)$$

Таким образом, для представленного на рисунке 6 случая угловой коэффициент облученности может быть вычислен по формуле:

$$\varphi = \varphi_I + \varphi_{II} + \varphi_{III}. \quad (21)$$

Рассмотрим теперь более общий случай, когда центр проекции принимающей поверхности расположен произвольно относительно излучающей поверхности.

Будем двигаться вдоль границы многоугольника так, чтобы многоугольник всегда оставался справа (рис. 6). Будем считать, что участок границы излучающего многоугольника имеет положительную (отрицательную) ориентацию, если при таком движении проекция принимающей поверхности остается справа (слева). Тогда угловой коэффициент облученности элемента принимающей поверхности от излучающей поверхности в виде треугольника ACB (рис. 6) вычисляется по формуле:

$$\varphi = k_{\text{оп}}^{(I)} \varphi_I + k_{\text{оп}}^{(II)} \varphi_{II} + k_{\text{оп}}^{(III)} \varphi_{III}, \quad (22)$$

где $k_{\text{оп}}^{(l)}$ – коэффициент ориентации участка l , определяемый следующим образом:

$$k_{\text{оп}}^{(l)} = \begin{cases} 1, & \text{если } l \text{ имеет положительную ориентацию,} \\ 0, & \text{если проекция центра элемента принимающей} \\ & \text{поверхности лежит на прямой, содержащей } l, \\ -1, & \text{если } l \text{ имеет отрицательную ориентацию.} \end{cases} \quad (23)$$

Границу произвольного многоугольника можно представить в виде последовательно отрезков, которые по расположению к оси абсцисс можно разбить на 4 типа: пересекающие ось под острым углом (T_I), пересекающие ось под тупым углом (T_{II}), параллельные оси (T_{III}), перпендикулярные оси (T_{IV}). Рассуждая как и при вычислении криволинейных интегралов вдоль отрезков типа T_I – T_{III} (формулы (17)–(19)), для отрезков типа T_{IV} легко получить аналогичные выражения. Например, для отрезка AE (рис. 6), определяемого уравнением $x = -a$, где y изменяется от 0 до h (в новой системе координат $X = -a - p$, где Y изменяется от $-q$ до $h-q$), будем иметь:

$$\varphi_{IV} = \frac{a+p}{2\pi\sqrt{(a+p)^2 + r^2}} \left(\arctg \frac{h-q}{\sqrt{(a+p)^2 + r^2}} + \arctg \frac{q}{\sqrt{(a+p)^2 + r^2}} \right). \quad (24)$$

Таким образом, для параллельных излучающей и принимающей поверхностей, размещенных произвольно относительно друг друга, угловой коэффициент облученности элемента принимающей поверхности от излучающей поверхности, представленной произвольным многоугольником, определяется по формуле:

$$\varphi = \sum_l k_{\text{оп}}^{(L_l)} \varphi_{L_l}, \quad (25)$$

где $\bigcup L_l$ – граница излучающей поверхности, а φ_{L_l} вычисляются по формулам (17)–(19), (24). При использовании формул (17)–(19), (24) следует учитывать, что на каждом из участков L_l границы излучающей поверхности величины a, b, h, p, q могут оказаться различными, т.к. отрезки L_l являются сторонами треугольников с различными геометрическими параметрами, и выражения для φ – φ_{IV} получены для случая, когда начало координат и рассматриваемый треугольник расположены в конфигурации рисунка 5.

Для оценки разработанной математической модели проведен сравнительный анализ с существующими методиками [9; 12]. В качестве исходных данных принято горение фронтона двускатной кровли с размерами в плане $2,75 \times 3$ м, излучающая поверхность в форме равнобедренного треугольника. Рассмотрим три варианта расположения центра проекции принимающей поверхности относительно излучающей:

- 1) в центре основания излучающей поверхности;
- 2) геометрическом центре излучающей поверхности;
- 3) точке с координатами (0, 2) (рис. 6).

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты расчета углового коэффициента облученности и плотности теплового потока

№ п/п	Наименование методики	Угловой коэффициент облученности, φ			Расчетная плотность теплового потока, q , кВт/м ²		
		1	2	3	1	2	3
1	Методика М.Я. Ройтмана [9]	0,138	0,118	0,135	16,19	13,90	15,92
2	Методика В.Ф. Кудаленкина [12]	0,075	0,069	–	8,81	8,08	–
3	Разработанная математическая модель	0,075	0,069	0,066	8,81	8,08	7,77

На основании расчетных значений видно, что методика [9] в 2 раза завышает значения углового коэффициента облученности и, соответственно, плотности теплового потока по сравнению с разработанной математической моделью. Методика [9] приводит излучающую поверхность к форме прямоугольника, что значительно увеличивает площадь излучающей поверхности (8,25 м²) в отличие от фактической (4,12 м²).

При сопоставлении полученных значений с методикой [12] очевидно, что значения в первом и во втором случае одинаковы, т.к. рассматриваются идентичная форма пламени и расположение относительно друг друга. Однако методика [12], в отличие от полученных

выражений, не позволяет рассчитать параметры варианта 3, рассматривающего произвольное расположение элемента принимающей поверхности.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что полученные выражения позволяют рассчитывать угловой коэффициент облученности, учитывая взаимное расположение излучающей и принимающей поверхностей. В отличие от существующих методик [9; 13] полученные формулы позволяют спроецировать центр принимающей поверхности в произвольную точку на плоскости излучающей поверхности, что обеспечит получение более точных значений углового коэффициента облученности, а следовательно, и расчетных значений плотности теплового потока. При этом в качестве излучающей поверхности может выступать любой многоугольник. Предложенная математическая модель определения углового коэффициента облученности позволит уточнить методику расчета величины противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями с учетом индивидуальных особенностей рассматриваемых объектов.

Экспериментальные исследования по определению геометрических параметров излучающей поверхности от фронтона при горении двускатной кровли получены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T20M-051).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталеv, Б.М. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 1. – 606 с.
2. Modest, M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest. – Oxford: Elsevier, 2013. – 897 p.
3. 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.
4. Шацков, А.О. Расчет угловых коэффициентов излучения при решении задач лучистого теплообмена в помещениях с инфракрасным отоплением / А.О. Шацков, Г.А. Кононыхин, С.И. Монах // Вестн. Донбас. нац. академ. строит. и архитект. – 2014. – Т. 107, № 3. – С. 41–46.
5. Hankinson, G. A Method for calculating the configuration factor between a flame and a receiving target for a wide range of flame geometries relevant to large scale fires / G. Hankinson // Fire Saf. Sci. – 1986. – Vol. 1. – P. 197–206.
6. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics / D. Drysdale. – Chichester: University of Edinburgh, 1999. – 470 p.
7. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
8. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
9. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
10. Karlsson, B. Enclosure Fire Dynamics / B. Karlsson, J.G. Quintiere. – Boca Raton: CRC Press, 2000. – 316 p.
11. 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.
12. Пожарная профилактика в строительстве: учебник / Б.В. Грушевский [и др.]; под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М., 1985. – 454 с.
13. 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.

Математическая модель определения углового коэффициента облученности при расчете противопожарных разрывов между зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов

Mathematical model for determining the configuration factor when calculating fire risks between buildings with double roofs made of combustible materials

Пастухов Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Министерство по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь, отдел науки
и инновационного развития, начальник отдела
Адрес: ул. Революционная, 5,
220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: plamennyj98@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1437-1913

Sergey M. Pastukhov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Ministry for Emergency Situations of the Republic
of Belarus, Department of Scientific
and Innovation Activity, Head of the Department
Address: Revolyutsionnaya str., 5,
220030, Minsk, Belarus
e-mail: 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 науки
и инновационного развития, ведущий
научный сотрудник
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: alexpltn@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5463-6029

Aleksandr S. Platonov

PhD in Physics and Mathematics 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
e-mail: 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, преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: teter9212@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7405-5774

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, Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: teter9212@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7405-5774

Дробыш Антон Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, начальник лаборатории
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: aantox@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9528-3108

Anton S. Drobysch

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific,
Head of Laboratory
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: aantox@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9528-3108

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.93>

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE CONFIGURATION FACTOR WHEN CALCULATING FIRE RISKS BETWEEN BUILDINGS WITH DOUBLE ROOFS MADE OF COMBUSTIBLE MATERIALS

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

Purpose. To develop a mathematical model for estimating the configuration factor, which takes into account the triangular shape of the radiating surface and the mutual positional relationship relative to the receiving surface.

Methods. The development of equations for determining the configuration factor was based on the results of the analysis of experimental studies and existing approaches to determining the magnitude of fire gaps between buildings and structures, and Lambert's law for determining the amount of energy transmitted from the radiation to the receiving surface.

Findings. For parallel radiating and receiving surfaces, located arbitrarily relative to each other, the analytical expression is obtained that allows determining the configuration factor of an element of receiving surface by emitting surface which have the shape of an arbitrary convex polygon.

Application field of research. Determination of the fire breaks between buildings, taking into account the individual characteristics of the objects calculated – gabled roof made of combustible materials.

Keywords: fire-break, flame's geometrical parameters, configuration factor, combustible roofing materials.

(The date of submitting: January 26, 2020)

REFERENCES

1. Khrustalev B.M. *Teplo- i massoobmen* [Heat and mass transfer]: tutorial in 2 parts. Minsk: BNTU, 2007. Part 1. 606 p. (rus)
2. Modest M.F. *Radiative Heat Transfer*. Oxford: Elsevier, 2013. 897 p.
3. 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 assessment minimum distance between the buildings at the case of fire exposure]. *Vestnik Komandno-inzhernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 2 (20). Pp. 23–31. (rus)
4. Shatskov A.O., Kononykhin G.A., Monakh S.I. Raschet uglovykh koeffitsientov izlucheniya pri reshenii zadach luchistogo teploobmena v pomeshcheniyakh s infrakrasnym otopeniem [Calculation of the configuration factor when solving problems of radiant heat transfer in rooms with infrared heating]. *Journal of Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2014. Vol. 107, No. 3. Pp. 41–46. (rus)
5. Hankinson G.A Method for calculating the configuration factor between a flame and a receiving target for a wide range of flame geometries relevant to large scale fires. *Fire Safety Science*, 1986. Vol. 1. Pp. 197–206.
6. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester: University of Edinburgh, 1999. 470 p.
7. Mikheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Heat transfer basics]. Moscow: Energiya, 1977. 344 p. (rus)
8. Fokin K.F. *Stroitel'naya teplotekhnika ogradhdayushchikh chastey zdaniy* [Construction heat engineering of envelope building]. Moscow: Stroyizdat, 1973. 287 p. (rus)
9. Roytman M.Y. *Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve* [Fire safety regulation in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 590 p. (rus)
10. Karlsson B., Quintiere J. G. *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 316 p.
11. 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.
12. 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. Kudalengin. Moscow, 1985. 454 p. (rus)
13. Pastukhov S.M., Teteryukov A.V. Metodika provedeniya eksperimental'nykh issledovaniy po opredeleniyu geometricheskikh parametrov plameni pri gorenii krovel'nykh materialov [The method of experimental researches to determine the geometric parameters of the flame during combustion of roofing materials]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 176–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.104>

УДК 627.8.059.22::712.5

НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Пастухов С.М., Османов Х.С., Миканович Д.С.

Цель. Провести анализ нормативного регулирования безопасности гидротехнических сооружений (водохранилищ, шламохранилищ, водоемов технического назначения) в странах Центральной Азии для определения правовых основ по организации их безопасной эксплуатации. Обосновать основные направления по улучшению системы обеспечения безопасности и надежности гидротехнических сооружений напорного фронта.

Методы. Метод теоретического анализа литературных источников применен при проведении оценки нормативно-правовой базы стран Центральной Азии в области обеспечения безопасности гидротехнических сооружений различного типа. Выполнена обработка полученных результатов с использованием метода оценивания и теоретического обобщения полученных данных.

Результаты. Установлено, что регулирование отношений в сфере безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений в странах центральной Азии осуществляется на основе общего законодательства по водному хозяйству, энергетике и экологии. В данных законодательных актах определены правовые основы по организации безопасной эксплуатации различных типов гидротехнических сооружений, однако отсутствуют механизмы (способы), позволяющие произвести оценку риска возникновения чрезвычайных ситуаций на сооружениях напорного фронта (водохранилищ, шламохранилищ, водоемов технического назначения) с учетом всех особенностей (мест расположения, способов регулирования, гранулометрического состава грунтов, химического состава фильтрующейся жидкости). Таким образом, актуальной задачей является разработка методики оценки риска возникновения гидродинамических аварий на сооружениях напорного фронта с учетом их отличительных особенностей.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы при комплексной оценке состояния гидротехнических сооружений Министерством природных ресурсов, а также Министерством по чрезвычайным ситуациям при разработке средне- и долгосрочных прогнозов возникновения чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: безопасность гидротехнических сооружений, риск возникновения чрезвычайных ситуаций, дамба, плотина, мониторинг, критерии безопасности, гидродинамическая авария.

(Поступила в редакцию 22 декабря 2020 г.)

Введение

Водоохранилища представляют собой сложные природно-технические комплексы. Создаваемые на базе рек, озер путем частичного или полного обвалования в промышленных, энергетических, рекреационных целях, а также для борьбы с наводнениями, водохранилища несут определенное отрицательное воздействие на окружающую природную среду. Негативная сторона достаточно разнообразна и основана на реальном опыте их эксплуатации. Так, в верхнем бьефе происходит разрушение коренных берегов, заболачивание и подтопление территорий, изменение качества вод и микроклимата, аккумуляция в донных отложениях продуктов переработки. В нижнем бьефе – переосушение поймы в результате изменения водного режима, изменение качества вод, проявление эрозионной деятельности, изменение термического и ледового режимов, а также местных климатических условий.

Практика эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) показывает, что возникновение на первый взгляд даже незначительных нештатных ситуаций на данных типах сооружений может привести к чрезвычайным ситуациям в больших масштабах. Анализ данных [1; 2] показывает, что вероятность аварий увеличивается при эксплуатации сооружений более 30–40 лет. Статистический анализ аварий, произошедших в мире на различных гидротехнических сооружениях [3; 4], показал, что их ограждающие конструкции относительно надежны, однако на каждую тысячу плотин приходится одна крупная авария или авария с тяжелыми последствиями (человеческие жертвы, большие материальные потери, экологические нарушения и др.). По данным [5] можно отметить, что от правильной эксплуатации и состояния безопасности плотин и других ГТС в регионе Центральной Азии зависит около

90 % всего сельскохозяйственного производства, 40 % выработки электроэнергии, безопасность более 15 млн человек, проживающих на территориях нижних бьефов сооружений, и в целом устойчивое функционирование других отраслей экономики.

Применение прогнозных методов, учитывающих особенности возникновения чрезвычайных ситуаций на данных типах сооружений, определяется социальными, экологическими и экономическими аспектами. Социальный аспект выражается в снижении гибели людей от чрезвычайных ситуаций, экологический – в минимизации вреда окружающей среде при эксплуатации и возможных авариях на ГТС, а экономический – в максимально возможном сохранении материальных средств при эксплуатации ГТС и ликвидации чрезвычайных ситуаций на них.

Основная часть

Основным направлением совершенствования законодательства в сфере безопасности ГТС является разработка системы профилактических мер и государственный контроль за строгим соблюдением всех регламентов как при проектировании, так и при эксплуатации. Создание гарантий безопасности плотин и сооружений, расположенных на трансграничных водных ресурсах, имеет особое значение с точки зрения возможного негативного влияния на безопасность соседних стран.

Исходя из анализа требований^{1, 2, 3, 4} [1], предъявляемых к безопасности ГТС в Центральной Азии, ведущая роль в данном направлении принадлежит законодательству Узбекистана. В стране создана специальная структура по надзору за крупными сооружениями, а также подготовлен Закон «О безопасности ГТС»⁵, в котором определен механизм регулирования отношений, возникающих при осуществлении деятельности по обеспечению безопасности при проектировании, строительстве, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, восстановлении, консервации и ликвидации ГТС. В конце 2010 г. подобный документ принят и в Таджикистане. На основе выработанного модельного инструмента остальные страны приняли соответствующий закон. Казахстан сделал это только после аварии на ГТС с человеческими жертвами [5].

В Республике Кыргызстан нормативно-правовую базу по безопасности ГТС составляет Водный кодекс⁶. В документе закреплена структура информационно-управляющей системы о наводнениях, засухе, сходе селей и оползней, состоянии и устойчивости ГТС, а также приводится прогноз потенциальной опасности объектов для населения. Кодекс определяет основные принципы правовых отношений в области использования и охраны водных объектов, однако не приводит механизма реализации мероприятий по оценке риска возникновения ЧС на данных типах сооружений с учетом их отличительных особенностей.

Водный кодекс⁷ является основой регулирования правовых отношений в сфере обеспечения безопасности водных объектов и в Республике Таджикистан. В нем определены ос-

¹ Законы, кодексы, указы, распоряжения об охране окружающей среды. Президентская библиотека Управления делами Президента Азербайджанской Республики [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://energo-cis.ru/wyswyg/file/Zakon/Nacional/Azerb/Азербайджан%20Кодексы%20Законы%20Указы%20есо_m4_2.pdf – Дата доступа: 20.10.2020.

² Развитие регионального сотрудничества в распределении и использовании водных ресурсов Республики Азербайджан [Электронный ресурс] / А. Ахундов, С. Гасанзаде. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/45355842-Razvitie-regionalnogo-sotrudnichestva-v-raspredelenii-i-ispolzovanii-vodnyh-resursov-v-azerbaydzhanskoj-respublike.html>. – Дата доступа: 16.10.2020.

³ О безопасности гидротехнических сооружений: Закон Респ. Азербайджан от 18 дек. 2015 г. № 46-VQD: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2016 г. – Баку, 2015. – 21 с.

⁴ Об утверждении Перечня гидротехнических сооружений государственного и местного значения, их классификации по режиму и безопасности, Правил составления и ведения государственного реестра гидротехнических сооружений и размеров, границ и правил использования охраняемых зон: постановление Респ. Азербайджан от 21 августа 2003 г., № 109: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2020 г. – Баку, 2003. – 32с.

⁵ О безопасности гидротехнических сооружений: Закон Респ. Узбекистан от 17 янв. 2009 г. № 238: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2020 г. – Ташкент, 2009. – 32 с.

⁶ Водный кодекс Кыргызской Республики: 12 янв. 2005 г. : принят Законодательным собранием Жогорку Кенеша Кыргызской Республики: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2020. – Бишкек, 2005. – 35 с.

⁷ Водный кодекс Республики Таджикистан: 20 дек. 2000 г. № 57: принят постановлением МН МОРТ: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2020 г. – Душанбе, 2000. – 17 с.

новые условия размещения, проектирования, строительства и ввода в эксплуатацию предприятий, сооружений и других объектов, влияющих на состояние вод, порядок эксплуатации водохранилищ, а также мероприятия по предупреждению и ликвидации вредного воздействия вод.

Уточнение мероприятий, направленных на недопущение возникновения аварийных событий и минимизацию ущерба при их реализации, предусмотрено в Законе о безопасности ГТС⁸.

В Республике Туркменистан в качестве основного регулятора безопасности выступают Правила эксплуатации гидротехнических сооружений (Кодекс Туркменистана «О воде»⁹). В данном нормативном правовом акте отражены вопросы общего и специального водопользования, права и обязанности водопользователей, условия пользования водными объектами для сброса сточных вод. Анализ нормативно-правовой базы Республики Туркменистан показал, что в ней определены основные принципы безопасного использования водных ресурсов, однако не предусмотрены механизмы их реализации.

Институционально-правовая база в Азербайджане, а также правовые отношения, связанные с использованием и охраной водных объектов, регулируются Водным кодексом¹⁰ и другими подзаконными актами. Азербайджанская Республика присоединилась к 20 международным конвенциям: в 2000 г. – к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер и в 2002 г. к Протоколу по проблемам воды и здоровья этой Конвенции¹¹.

Для успешного решения проблем в области водных отношений принято более 30 нормативных правовых актов. Ответственность за состояние водных ресурсов возложена на различные государственные органы и организации: Министерство экологии и природных ресурсов, Министерство по чрезвычайным ситуациям в лице Государственного агентства водных ресурсов (далее – ГАВР); акционерное общество «Азерсу»; акционерное общество «Мелиорация и водное хозяйство Азербайджана»; акционерное общество «Азенержи».

Министерство экологии и природных ресурсов осуществляет государственную водную политику, направленную на сохранение и устойчивое использование водных ресурсов – поверхностных и подземных, а также на предотвращение их загрязнения, проводит инвентаризацию водных ресурсов и управляет сетью станций мониторинга для осуществления непрерывных гидрометрических, гидрогеологических и гидрохимических наблюдений. АО «Азерсу» является основным органом страны по организации водоснабжения и водоотведения, а также осуществляет контроль по данным направлениям деятельности. АО «Мелиорация и водное хозяйство Азербайджана» является основным водным оператором, отвечает за водообеспечение секторов экономики посредством оценки потребностей в воде и разработки прогнозов и норм водопользования.

ГАВР – орган исполнительной власти, претворяет в жизнь усовершенствованные мероприятия в области управления и регулирования водных ресурсов, осуществляет постоянный контроль за техническим состоянием водохранилищ, а также проводит мониторинг водных объектов, поверхностных и подземных вод, гидротехнических сооружений, систем водообеспечения и обеспечивает надежную безопасность государственных водохозяйственных объектов на территории страны. На баланс ГАВР переданы четыре каскадные водохранилища на реке Куре комплексного использования (Шамкирское, Еникендское, Мингечаурское и Варваринское), одно водохранилище для обеспечения водоснабжением городов Баку, Сумгаит, Хырдалан и жителей Апшеронского полуострова, имеющие стратегическое значение для республики.

С целью реализации одной из ключевых задач, стоящей перед Азербайджаном и заключающейся в обеспечении его водной безопасности, которая связана с продовольственной и энергетической безопасностью, в стране разработана Водная стратегия на 2017–2035 годы

⁸ О безопасности гидротехнических сооружений: Закон Респ. Таджикистан от 29 декабря 2010 г., № 666: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2020 г. – Душанбе, 2010. – 6 с.

⁹ Водный кодекс Республики Туркменистан от 15 окт. 2015 г. № 685-V: принят Меджлисом Туркменистана: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2020 г. – Ашхабад, 2015. – 8 с.

¹⁰ Водный кодекс Азербайджанской Республики от 26 дек. 1997 г. № 38: принят Милли Меджлис Азербайджанской Республики: с изм. и доп.: текст по сост. на 1 янв. 2020 г. – Баку, 1997. – 41 с.

¹¹ Протокол по проблемам воды и здоровья к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер 1992 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/water_protection.shtml. – Дата доступа: 16.10.2020.

в отношении комплексного управления водными ресурсами¹². Национальная Водная стратегия направлена на развитие управления водными ресурсами и охрану водных ресурсов, а также водоснабжения и санитарии в Азербайджане, чтобы лучше соответствовать стандартам и целям на международном и местном уровнях. Проект Стратегии содержит краткосрочные (6 лет), среднесрочные (18 лет) и долгосрочные цели.

Основной орган, ответственный за обеспечение безопасности водных ресурсов, – Министерство по чрезвычайным ситуациям. В задачи по обеспечению безопасности входят¹³:

- 1) организация охраны объектов особого назначения, в том числе трубопроводов, источников питьевой воды, электростанций, гидродинамических сооружений;
- 2) определение зон наводнения и селей и проведения берегоукрепительных работ, организация проектирования их защитных зон и обеспечение контроля за строительством;
- 3) осуществление совместно с соответствующими государственными органами контроля за соблюдением правил безопасности, санитарно-гигиенических правил и норм при эксплуатации источников питьевой воды в целях безопасного обеспечения населения питьевой водой;
- 4) организация совместно с государственными органами контроля за выполнением мероприятий по защите природных ресурсов страны;
- 5) осуществление необходимых мер по созданию системы прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Актуальность обеспечения безопасности повышается с учетом требований в части отнесения эксплуатируемых совместно с другими государствами (Армения, Грузия, Турция и Южная Осетия) гидроэлектростанций каскадного типа, крупных водохранилищ, водяных насосных сооружений, плотин, защитных сооружений водохранилищ и побережий рек, а также расположенных в принадлежащем Азербайджанской Республике секторе Каспийского моря морских сооружений – к особо охраняемым гидротехническим сооружениям государственного значения. Указанные сооружения в соответствии с постановлением Кабинета Министров Азербайджанской Республики «Об утверждении Правил составления и ведения государственного реестра гидротехнических сооружений» от 21 августа 2003 г. за № 109 подлежат регистрации в Государственном реестре гидротехнических сооружений, который является неотъемлемым информационным элементом общей системы обеспечения безопасности и мониторинга¹⁴. Ведение и сопровождение данного реестра ГТС поручено АО «Мелиорация и водное хозяйство Азербайджана».

Ниже приведен обзор нормативных правовых актов по оценке безопасности водных ресурсов в Азербайджанской Республике. С учетом пристального внимания в последнее время к социальным (здоровье населения) и природоохранным аспектам обеспечения водной безопасности, неотъемлемой частью которой является обеспечение безопасности дамб и плотин, проведение анализа нормативно-правового обеспечения в данном направлении является актуальной и своевременной задачей.

Водный кодекс Азербайджанской Республики¹⁵ регулирует порядок использования и охраны водных объектов в Азербайджанской Республике и регламентирует государственное управление водными ресурсами (осуществление учета и планирования вод), поскольку управление использованием и охраной вод как важного природного ресурса предполагает планирование и получение сведений о состоянии вод путем их учета. Следует отметить, что отдельной главой в кодексе выделен материал о использовании особо охраняемых водных объектов, где указаны правила пользования наиболее важной с точки зрения экономической и экологической территории Азербайджана – Каспийским морем.

В Республике Азербайджан под безопасностью гидротехнических сооружений понимается комплексный показатель, включающий как технические, так и социальные, экономические и экологические аспекты¹⁶. В соответствии с требованиями Закона Азербайджанской

¹² Руководящие принципы разработки национальных программ по обеспечению безопасности низконапорных гидротехнических сооружений в странах Центральной Азии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2015/WAT/12Dec_03-04_Almaly/Guiding_Document_for_the_Safety_of_Low-Pressure_Dams_Short_Version_271015.pdf. – Дата доступа: 16.10.2020.

¹³ См. сноску 12.

¹⁴ См. сноску 4.

¹⁵ См. сноску 10.

¹⁶ См. сноску 1.

Республики о безопасности ГТС¹⁷ их проектирование, строительство и эксплуатация должны осуществляться при обеспечении всех составляющих безопасности.

Согласно ст. 3 Закона Азербайджанской Республики о безопасности ГТС их перечень по государственному и местному значению определяется количеством и масштабом экономических, общественных и экологических потерь и воздействий, которые могут иметь место в результате выхода из строя и аварии сооружений по какой-либо причине¹⁸.

В нормативном акте определена классификация гидротехнических сооружений по их безопасности и право собственности, эксплуатации на гидротехнические сооружения; определен порядок функционирования государственного реестра ГТС; определен свод правил обеспечения безопасности гидротехнических сооружений. Государственный надзор и контроль в данной области включает:

- 1) определение риска аварии на сооружениях;
- 2) составление и соблюдение декларации безопасности сооружений;
- 3) непрерывность в эксплуатации сооружений;
- 4) подготовку, осуществление мер по обеспечению безопасности сооружений, в том числе **установление критериев их безопасности**, оснащение необходимыми техническими средствами для контроля за их состоянием, обеспечение необходимых категорий технической квалификации эксплуатационного персонала;

- 5) принятие опережающих комплексных мер с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций на сооружениях;

- 6) финансирование мероприятий по обеспечению безопасности сооружений;
- 7) установление ответственности за действия (или бездействие), которые повлекли снижение степени безопасности сооружений ниже установленного уровня.

Уточнение требований данного Закона приводится МСН 33-01-2011 «Гидротехнические сооружения. Основные положения»¹⁹. Нормами определено, что сооружения, повреждения которых могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций, на всех стадиях их создания и эксплуатации подлежат декларированию безопасности. Декларация безопасности является обязательной частью проекта, она подлежит утверждению в органах надзора за безопасностью гидротехнических сооружений при согласовании проекта. Нормативным правовым актом установлена классификация гидротехнических сооружений по их безопасности, по источникам и факторам, создающим риск, которая включает:

- 1) конструктивную безопасность;
- 2) технологическую безопасность;
- 3) безопасность от стихийных бедствий;
- 4) безопасность от внутренних и внешних провокаций.

В данном НПА указано, что в составе проекта гидротехнических сооружений следует разрабатывать специальный проект натурных наблюдений за их работой и состоянием как в процессе строительства, так и при эксплуатации для своевременного выявления дефектов и неблагоприятных процессов, назначения ремонтных мероприятий, предотвращения отказов и аварий, улучшения режимов эксплуатации и **оценки уровня безопасности и риска аварий**. С целью более полного раскрытия неопределенностей по факторам, определяющим надежность и безопасность гидротехнических сооружений и конструкций, уточнения расчетных характеристик и расчетных схем, сочетаний нагрузок и воздействий, а также предельных состояний и оптимизации проектирования по методу предельных состояний в НПА указано на допустимость применения вероятностного анализа для обоснования принимаемых технических решений системы «сооружение – основание».

МСН 33-01-2011 является единственным нормативным документом, в котором приведены допустимые значения уровня риска аварий на гидротехнических сооружениях в зависимости от их класса (см. таблицу 1).

В данном НПА закреплены правовые основы по установлению основных принципов обеспечения безопасности гидротехнических сооружений, включающие требования о необходимости проведения процедуры по оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций на всех классах сооружений и сравнения полученных значений с предельно допустимыми с разработкой соответствующих мероприятий по его снижению. Недостатком требований,

¹⁷ См. сноску 3.

¹⁸ См. сноску 3.

¹⁹ См. сноску 12.

на наш взгляд, является то, что они не определяют порядок (методику) расчета достаточного риска чрезвычайных ситуаций, а также не имеют направляющих ссылок на другие законодательные акты по оценке риска.

Таблица. – Допустимые значения уровня риска аварий на напорных гидротехнических сооружениях

Класс сооружения	Уровень риска аварии, 1/год
I	$5 \cdot 10^{-5}$
II	$5 \cdot 10^{-4}$
III	$2,5 \cdot 10^{-3}$
IV	$5 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, на основании анализа нормативно-правового регулирования в сфере обеспечения безопасности ГТС в Азербайджане установлено, что к основным проблемным вопросам относятся²⁰:

- 1) отсутствие единой терминологии, характеризующей состояние и уровень безопасности ГТС;
- 2) несопоставимость данных, получаемых эксплуатационными службами различных организаций, вследствие различия методик сбора, программного и приборного обеспечения;
- 3) проблема собственности на гидротехнические сооружения, касающаяся небольших гидротехнических сооружений в основном IV (иногда III) класса, принадлежавших бывшим колхозам, совхозам и перешедших к категории бесхозных;
- 4) проблема сбора информации на объектах (главным образом IV класса) в связи с отсутствием или недостатком технологического оборудования и специализированного программного обеспечения;
- 5) физическое старение гидротехнических сооружений, которые предъявляют все более жесткие требования к техническим средствам контроля их состояния (по данным [1–2] период эксплуатации 60 % ГТС Азербайджана превышает 50 лет);
- 6) отсутствие мониторинговой системы по обеспечению сейсмической безопасности ГТС;
- 7) отсутствие единой методологии оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на ГТС.

Решение указанных задач позволит провести комплексный анализ состояния и определить общий показатель безопасности ГТС, а также степень аварийности сооружений в зависимости от их класса. Полученные данные о состоянии ГТС могут быть использованы для определения объема финансирования мероприятий по прогнозированию и ликвидации возможных аварий.

Заключение

В результате проведенного анализа нормативных правовых актов установлено, что вопросы безопасности гидротехнических сооружений в странах Центральной Азии представлены в общем законодательстве по водному хозяйству, энергетике и экологии.

Действующие НПА регулируют вопросы строительства, эксплуатации, обслуживания объектов и надзора за их состоянием. Основные обязанности в области безопасности ГТС и проведения инспекций возлагаются на собственника ГТС. Следует отметить, что во всех странах определены правовые основы по организации безопасной эксплуатации различных типов гидротехнических сооружений. Однако в нормативных правовых актах отсутствуют механизмы, позволяющие произвести оценку риска возникновения чрезвычайных ситуаций на различных типах гидротехнических сооружений (водохранилищ, шламохранилищ, водоемов технического назначения и др.) и гидроузлах с учетом всех особенностей (мест расположения, способов регулирования, гранулометрического состава грунтов, химического состава фильтрующей жидкости и др.). Поэтому немаловажное значение имеет изучение соотношения причин и факторов возникновения гидродинамических аварий, оценка их влияния на вероятность чрезвычайных ситуаций. В связи с этим требуется разработка методики, учитывающей все особенности гидротехнических сооружений, что позволит проводить полномасштабную оценку технического состояния гидротехнических сооружений различного типа с прогнозированием возможных чрезвычайных ситуаций на них.

²⁰ См. сноска 1–4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние ирригационно-мелиоративного строительства на почвенно-мелиоративную обстановку земель Ильичевского района Нахичеванской АССР / М.Я. Искендеров [и др.]. – Баку: НТО АЗНИИГиМ. – Баку, 1982–1988. 35+49 с.
2. Халилов, Т.А. Оценка экомелиоративного состояния земель Шарурского и Садаракского районов Нахичеванской АР / Т.А. Халилов, М.Я. Искендеров // Сб. науч. тр. АЗНИИГиМ. – Баку, 2008. – Т. XXVIII. – С. 175–180.
3. Пастухов, С.М. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроузлах Республики Беларусь, расположенных в каскадах: дис. ... канд. техн. наук: 09.05.11 / С.М. Пастухов. – Минск, 2011. – 132 л.
4. Миканович, Д.С. Прогнозирование возникновения чрезвычайных ситуаций на грунтовых подпорных сооружениях шламохранилищ Республики Беларусь: дис. ... канд. техн. наук: 20.05.20 / Д.С. Миканович. – Минск, 2020. – 214 л.
5. Региональная информационная база водного сектора Центральной Азии: информ. отчет о НИР / НИЦ МКВК, UNEP/GRID-Arendal, UNECE. – Ташкент, 2011. – 97 с.

Нормативное регулирование безопасности водных объектов
Normative regulation of water objects safety

Пастухов Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Министерство по чрезвычайным
ситуациям Республики Беларусь,
отдел науки и инновационного развития,
начальник отдела

Адрес: ул. Революционная, 5,
220030, г. Минск, Беларусь

e-mail: plamennyj98@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1437-1913

Sergey M. Pastukhov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus,
Science and Innovation Development
Department, Head of Department

Address: Revolyutsionnaya str., 5,
246023, Minsk, Belarus

e-mail: plamennyj98@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1437-1913

Османов Хикмет Собирович

Министерство по чрезвычайным ситуациям
Азербайджанской Республики,
главное управление кадровой политики,
начальник управления

Адрес: ул. М. Мушвига, 501,
AZ1073, г. Баку, Азербайджан

e-mail: az.hikmet@gmail.com

Khikmet S. Osmanov

Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Azerbaijan,
Main Department of Personnel Policy,
Head of Department

Address: M. Mushviga str., 501,
AZ1073, Baku, Azerbaijan

e-mail: az.hikmet@gmail.com

Миканович Дмитрий Станиславович

кандидат технических наук

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

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

e-mail: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

Dmitry S. Mikanovich

PhD in Technical Sciences

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

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

e-mail: dmikanovich@list.ru

ORCID: 0000-0002-3560-1741

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.104>

NORMATIVE REGULATION OF WATER OBJECTS SAFETY

Pastuchov S.M., Osmanov Kh.S., Mikanovich D.S.

Purpose. To analyze the normative regulation of the safety of hydraulic structures (reservoirs, sludge storage facilities, reservoirs for technical purposes) in the countries of Central Asia in order to determine the legal framework for organizing their safe operation. To substantiate the main directions of improving the system of ensuring safety and reliability of hydraulic structures of the pressure front.

Methods. The method of theoretical analysis of references was applied in assessing the regulatory and legal framework of the Central Asian countries in the field of ensuring safety of hydraulic structures of various types. The processing of the obtained results is carried out using the method of estimation and theoretical generalization of the data obtained.

Findings. It has been established that the regulation of relations in the field of safe operation of hydro-technical structures in the countries of Central Asia is carried out on the basis of general legislation on water management, energy and ecology. These legislative acts define the legal framework for organizing the safe operation of various types of hydraulic structures, however, there are no mechanisms (methods) to assess the risk of emergencies at the structures of the pressure front (reservoirs, sludge storage facilities, technical reservoirs) taking into account all the features (locations, methods of regulation, granulometric composition of soils, chemical composition of the filtering fluid). Thus, an urgent task is to develop a methodology for assessing the risk of hydrodynamic accidents at the pressure front structures, taking into account their distinctive features.

Application field of research. The research results can be used for a comprehensive assessment of the state of hydraulic structures by the Ministry of Natural Resources, as well as the Ministry of Emergency Situations in the development of medium and long-term forecasts of emergencies.

Keywords: safety of hydraulic structures, risk of emergencies, dam, dike, monitoring, safety criteria, hydrodynamic accident.

(The date of submitting: December 22, 2020)

REFERENCES

1. Iskenderov M.Ya. et al. *Vliyanie irrigatsionno-meliorativnogo stroitel'stva na pochvenno-meliorativnyuyu obstanovku zemel' Il'ichevskogo rayona Nakhichevanskoj ASSR* [Impact of irrigational and ameliorative construction on soil and meliorative condition of lands in Ilyich district of Nakhchivan ASSR]. NTO AzNIIGiM [Azerbaijan Scientific Production Association «Water engineering and Amelioration»]. Baku, 1982–1988. 35+49 p. (rus)
2. Khalilov T.A., Iskenderov M.Ya. *Otsenka ekomeliorativnogo sostoyaniya zemel' Sharurskogo i Sadarakskogo rayonov Nakhichevanskoj AR* [Estimation of eco-ameliorative condition of the lands in Sharur and Sadarak districts in Nakhchivan AR]. *Nauchnye trudy AzNIIGiM*. Baku, 2008. Vol. XXVIII. Pp. 175–180. (rus)
3. Pastukhov S.M. *Otsenka riska vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na gidrouzlahk Respubliki Belarus', raspolozhennykh v kaskadakh* [Assessment of the risk of emergencies at hydro-units of the Republic of Belarus located in cascades]. PhD technical sci. diss.: 09.05.11. Minsk, 2011. 132 p. (rus)
4. Mikanovich D.S. *Prognozirovanie vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na gruntovykh podpornykh sooruzheniyakh shlamokhranilishch Respubliki Belarus'* [Forecasting the occurrence of emergency situations at ground retaining structures of sludge storage facilities of the Republic of Belarus]. PhD technical sci. diss.: 20.05.20. Minsk, 2020. 214 p. (rus)
5. *Regional'naya informatsionnaya baza vodnogo sektora Tsentral'noy Azii* [Regional information base of the water sector in Central Asia]: report (inform). Tashkent, 2011. 97 p. (rus)

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.113>

УДК 351.861

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ И ОЦЕНКЕ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ В УСЛОВИЯХ ДИВЕРСИОННО-ТЕРРОРИСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Бордак С.С.

Цель. Провести анализ места и роли гражданской обороны с учетом особенностей вооруженной борьбы в современных условиях. Предложить методический подход к оценке и прогнозированию диверсионно-террористического воздействия на объекты экономики, жизнеобеспечения и инфраструктуры.

Методы. В качестве теоретической базы использовались известные методы формальной логики, теории исследования операций, теории организации, оперативно-тактических расчетов, историко-аналитический метод, общенаучные (индукции, дедукции, анализа и синтеза) и специальные методы исследования, в том числе специально разработанные автором методики для решения рассматриваемой задачи.

Результаты. Проведен анализ особенностей современного вооруженного противоборства, места и роли гражданской обороны в обеспечении военной безопасности. Предложен методический подход к оценке и прогнозированию диверсионно-террористического воздействия на объекты экономики, жизнеобеспечения и инфраструктуры. Определены перспективные направления дальнейших исследований в области организации гражданской обороны.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть использованы в исследованиях, связанных с организацией гражданской обороны, в практической деятельности для проведения расчетов, необходимых для поддержки принятия решения начальником ГО района (города) на проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ, а также при разработке инженерно-технических мероприятий гражданской обороны и мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций в проектной документации.

Ключевые слова: период нарастания военной угрозы, органы управления гражданской обороной, аварийно-спасательные и другие неотложные работы, формирования гражданской обороны, диверсионно-террористическое воздействие.

(Поступила в редакцию 23 ноября 2020 г.)

Введение

Гражданская оборона (ГО) является одним из элементов обеспечения национальной безопасности Республики Беларусь, составной частью оборонных мероприятий государства, что находит отражение в белорусском законодательстве. Решение задач ГО как в мирное, так и в военное время осуществляется невооруженным способом, тем не менее в ходе исследований в данной области неизбежно возникает необходимость изучения возможных форм и содержания вооруженного противоборства, сил и средств возможного противника, которые могут применяться в войне, характер возможных последствий их применения, способы защиты населения и территорий от возникающих при этом опасностей, т.е. исследование войны, вооруженной борьбы.

Основная часть

Результаты анализа последних войн в Ираке, Афганистане, Ливии, Сирии свидетельствуют, что в современных условиях наблюдается смещение приоритетов на овладение инициативой в информационной сфере, основные усилия направляются не на уничтожение войск противника, а на дестабилизацию внутрисполитической обстановки. В ходе комплексного применения военной силы все чаще используются диверсионные

(партизанские) и террористические методы ведения боевых действий. Противоборствующими сторонами активно применяются меры невоенного характера, реализуются внешние угрозы через внутренние источники¹.

Для борьбы с неугодными государствами и политическими режимами все чаще используется протестный потенциал местного населения, экстремистские, террористические организации, криминальные группировки [1]. Этому способствует разработка концепций и механизмов смены действующей государственной власти в других государствах с использованием военной силы. Против государств, в отношении которых планируется агрессия, задействуются силы деструктивной оппозиции, получающие финансовую, материальную, информационную, академическую и другую поддержку от внешней управляющей силы. Тем самым последние приобретают широкие оперативные возможности по достижению военно-политических результатов без использования классических военных инструментов. Авторы подобных концепций [2–4] рассматривают ведение военных действий как совокупность действий регулярных вооруженных сил, других войск и воинских формирований, специальных служб, незаконных вооруженных формирований (НВФ), журналистов, дипломатов, гражданского населения в общей сетевцентрической системе. Ведение боевых действий и непосредственное применение средств поражения в ней является лишь частью сетевых процессов.

Результаты ретроспективного анализа военно-теоретических исследований [2–6] показывают, что гибридные стратегии противоборства рассматривались и ранее как один из эффективных инструментов для достижения внешнеполитических задач. Так, термин «4 Generation Warfare (4GW)», что дословно переводится как «4-е поколение противоборства» появился в литературе еще в 1989 г. и был связан с попытками разработать новую военную стратегию достижения военно-политических целей в условиях глобального мира [6]. В настоящее время возобновление интереса со стороны военных экспертов к этой теме связано с полученными практическими результатами и накопленным опытом, прежде всего в операциях вооруженных сил США в Ираке и Афганистане. В основу определения 4GW положен тезис, что к этому поколению относятся все формы конфликта, в которых одна из сторон не желает или не может использовать традиционные (симметричные) средства и методы противоборства, делая ставку на нетрадиционные асимметричные средства.

Важнейшими формами и способами подобного противоборства являются: терроризм, партизанская война, «цветные» революции, провоцирование экономических кризисов и др. Реализация таких технологий используется для переформатирования структуры власти и смены политического руководства. Подтверждением тому являются события в ряде стран Восточной Европы и арабского мира: Тунисе в 1987 г. и в 2010–2011 гг., Грузии в 2003 г., Украине в 2004 г. и 2013 г., Киргизии в 2005 г. и 2010 г., Ливане в 2005 г., Молдавии в 2009 г., Египте в 2011 г., Ливии в 2011 г., Сирии в 2011 г. Существенным элементом повышения эффективности противоборства нового типа является стратегическое информационное противоборство, используемое для управления поведением противостоящей стороны. Подобные технологии не требуют разработки качественно новых систем вооружений, опираются на существующие компоненты борьбы и являются, по сути, ее новой организационной моделью.

Особое место в современных конфликтах отводится силам специальных операций (ССО), частным военным компаниям, незаконным вооруженным формированиям (НВФ). Подготовка и координация масштабного сопротивления «гражданского» населения, проведение частных акций диверсионно-разведывательных групп противника (ДРГ) и НВФ в форме диверсионно-террористических и партизанских мероприятий вкупе с мерами несилового характера позволяет решать широкий круг задач и достигать поставленных целей в целом без вовлечения регулярных вооруженных сил. Достижение военно-политических целей в такой форме конфликта позволяет минимизировать риски открытой войны, снизить ее экономические издержки.

¹ Об утверждении Военной доктрины Республики Беларусь [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь, 20 июля 2016 г., № 412-З // Консультант Плюс: Версия Проф / ООО «ЮрСпектр», Нац реестр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020.

Проведенный автором анализ опыта применения ДРГ и НВФ в современных войнах и военных конфликтах позволяет сделать вывод, что их приоритетными целями на начальном этапе конфликта могут быть объекты и системы управления войсками, высшие должностные лица государства, объекты противовоздушной обороны, аэродромы базирования ударной авиации [1; 7]. В последующем основные усилия ДРГ и НВФ, вероятно, будут направлены на ослабление военно-экономического потенциала посредством проведения диверсионных действий на ключевых объектах экономики и инфраструктуры, объектах жизнеобеспечения населения. Успешное проведение таких мероприятий будет ослаблять оборонный потенциал государства, дестабилизировать внутргосударственную обстановку, создавать атмосферу неуверенности, паники, страха, провоцировать общественные противоречия.

С учетом изложенного необходимо отметить, что объекты экономики, инфраструктуры, обеспечивающие боеспособность Вооруженных Сил, других войск и воинских формирований, обеспечивающие жизнедеятельность населения, в современной войне становятся одними из самых уязвимых элементов и требуют надежной защиты. Представляется, что такая защита в полной мере может быть обеспечена за счет реализации комплекса оборонных мероприятий всеми элементами военной организации государства: Вооруженными Силами, другими войсками и воинскими формированиями, в том числе органами управления и силами гражданской обороны.

Проведенный анализ места и роли гражданской обороны в обеспечении обороноспособности государства [1; 8–12], позволяет сделать вывод, что планируемые мероприятия ГО направлены прежде всего на сохранение жизни и здоровья населения государства, а также на обеспечение устойчивого функционирования его экономики.

С одной стороны, это достигается реализацией комплекса объемно-планировочных, конструктивных, технологических и других решений при архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, за счет которых создаются условия, минимизирующие деструктивное воздействие средств поражения и упреждающие образование вторичных поражающих факторов. С другой стороны, за счет оперативного проведения органами управления и силами ГО комплекса неотложных работ в зонах поражения по спасанию людей, материальных и культурных ценностей, локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций, снижению уровня воздействия их опасных факторов после применения противником средств поражения. Согласно стандарту² такие работы можно отнести к аварийно-спасательным и другим неотложным работам (АСДНР).

Безусловно, требует проработки и осмысления место гражданской обороны в противодействии информационным вызовам и угрозам. Так, в составе сил ГО есть служба передачи и распространения информации, руководство которой возложено на Министерство информации Республики Беларусь. Видится, что в перспективе должны быть уточнены функции и задачи данной службы с учетом особенностей современного противоборства. Это задача дальнейшего исследования и предмет отдельных дискуссий.

Особое место в организации ГО занимает период нарастания военной угрозы (ПНВУ), т.к. согласно законодательству именно в этот период осуществляется переход органов управления и сил гражданской обороны на работу в условиях военного времени. В Законе Республики Беларусь³ указывается, что «ПНВУ – это часть мирного времени, предшествующая военному времени и характеризующаяся высоким накалом противоречий в межгосударственных или внутргосударственных отношениях, активизацией непосредственного приготовления противостоящих сторон к войне или вооруженному конфликту». Кроме того, в этот период противником для дестабилизации внутривнутриполитической обстановки могут применяться ДРГ и НВФ.

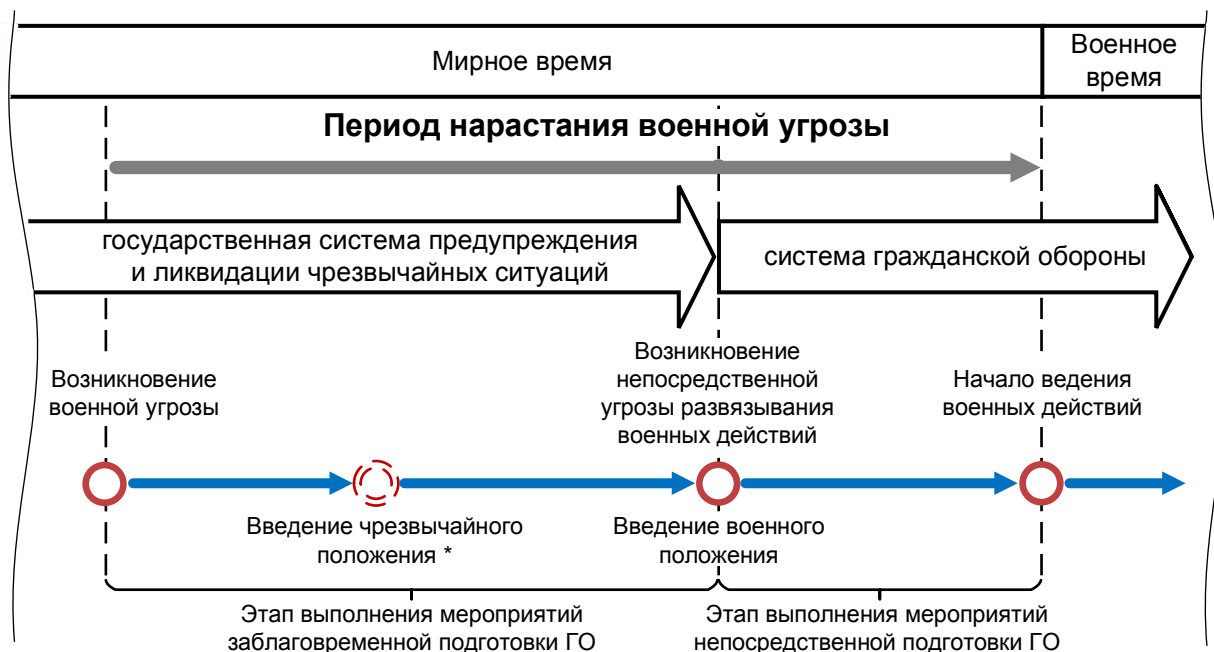
ПНВУ охватывает часть времени от выявления ряда факторов, указывающих на наличие военной угрозы, до начала военных действий. Периодизация обострения военной опасности и этапы выполнения подготовительных мероприятий ГО в ПНВУ, как вариант, приведены на рисунке 1.

С введением военного положения на территории Республики Беларусь органы и элементы государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций

² Безопасность в ЧС. Термины и определения основных понятий: СТБ 1429–2003. – Введ. 31.10.03. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2005. – 25 с. – (Безопасность в чрезвычайных ситуациях).

³ См. сноску 1.

(ГСЧС) трансформируются в систему ГО. В основе данной трансформации лежит процесс организации ГО, включающий проведение ряда взаимоувязанных мероприятий, таких как: оценка и прогнозирование обстановки; принятие решения начальником ГО на проведение мероприятий гражданской обороны; планирование этих мероприятий; постановка задач подчиненным органам управления и силам; организация взаимодействия, всестороннего обеспечения и управления. Органом управления, реализующим данные мероприятия на различных уровнях ведения ГО, являются штабы ГО, формируемые на базе органов и подразделений по ЧС.



* Может не вводиться.

Рисунок 1. – Периодизация обострения военно-политической обстановки и этапы выполнения подготовительных мероприятий гражданской обороны в период нарастания военной угрозы

В основе организации гражданской обороны района (города) лежит решение начальника ГО, которым определяется порядок, способы и сроки выполнения мероприятий ГО, а также необходимые для их выполнения силы и средства. Исследуя процесс принятия решения начальником ГО района (города) на проведение мероприятий ГО, необходимо отметить, что его во многом затрудняет резкое изменение обстановки и, как правило, отсутствие полной информации о ней, т.е. высокая степень неопределенности.

Как известно, в формализованном виде управление заключается в прогнозировании будущих состояний управляемой системы на основе имеющейся информации и принятии такого решения (выполнении такого действия), которое оптимизирует выбранный показатель эффективности. Целесообразно полагать, что вся деятельность штаба ГО, связанная с поддержкой принятия решения, должна быть ориентирована на его обоснование по заданному критерию, который будет наиболее рациональным для данных условий из всех альтернативных вариантов, с учетом прогнозирования состояния управляемой системы. Вместе с тем анализ практики организации ГО показывает, что в настоящее время методики оценки и прогнозирования обстановки на уровне района (города) при применении противником средств поражения не в полной мере учитывают возможное диверсионно-террористическое воздействие противника.

Для обеспечения начальников и штабов ГО соответствующими штабными методиками и другими средствами, позволяющими обоснованно принимать эффективные решения на проведение мероприятий гражданской обороны, требуется разработка специально ориентированного научно-методического аппарата, отсутствующего в настоящее время в органах управления.

К особенностям принятия решений начальником гражданской обороны для ликвидации последствий применения противником средств поражения можно отнести необходи-

мость их оперативного принятия наряду с необходимостью проведения штабом ГО значительного объема оперативно-тактических расчетов. Как правило, такие решения связаны с высокой степенью риска и требуют методической поддержки, обеспечения необходимой информацией и логическим обоснованием.

Для прогнозирования состояний управляемых систем, в том числе военных, обычно используется вероятностный подход. Представляется, что такой подход актуален и для специфики гражданской обороны. Это позволит повысить обоснованность принимаемых начальником ГО решений и будет способствовать повышению эффективности организации ГО, решению других управленческих задач штабом ГО района (города).

В основу разрабатываемой модели прогнозирования последствий может быть положена причинно-следственная связь двух процессов: воздействие поражающих факторов на объект при применении противником средств поражения и сопротивление самого объекта этому воздействию. Так как оба процесса носят ярко выраженный случайный характер, при оценке и прогнозировании возможной обстановки целесообразно проводить анализ характеризующих ее показателей, в основу которого должны быть положены законы распределения случайных величин.

Проведенный анализ показал, что в зависимости от имеющейся исходной информации для определения вероятностей значений этих показателей могут использоваться различные подходы:

статистический, когда вероятности определяются по имеющимся статистическим данным (при их наличии);

теоретико-вероятностный, используется для оценки редких событий, когда статистика практически отсутствует;

эвристический, основанный на использовании субъективных вероятностей, получаемых с помощью экспертного оценивания.

В рассматриваемом вопросе реальную статистику о возможных объемах аварийно-спасательных и других неотложных работ в случае разрушения объектов при применении противником средств поражения по понятным причинам получить не представляется возможным. Использовать реальные статистические данные прошлых военных конфликтов также не уместно, т.к. такие данные будут обладать низкой степенью воспроизводимости.

С учетом специфики возможных действий диверсионно-террористических формирований вероятность нарушения функционирования объекта экономики, жизнеобеспечения и инфраструктуры (объекта) можно описать вероятностью несанкционированного воздействия и поражения критически важного элемента этого объекта (КВЭ).

Согласно [13] под критическими элементами объекта понимаются производственные, конструктивные и технологические элементы объекта, разрушение которых приведет к прекращению нормального функционирования всего объекта экономики и возникновению чрезвычайной ситуации. Под поражением КВЭ понимается вывод его из строя, вследствие чего такой элемент утрачивает работоспособность и возможность выполнять свои функции в соответствии с предназначением. Для этого силам, осуществляющим диверсионно-террористическое воздействие, необходимо провести ряд таких последовательных действий, как: выдвижение к объекту, преодоление рубежа охраны или обороны, при возможности поражение КВЭ без проникновения на объект (обстрел, поджог), а в случае отсутствия такой возможности – проникновение на объект, проведение несанкционированных действий в отношении КВЭ и его поражение.

Расчетный алгоритм диверсионно-террористического воздействия противника на объект приведен на рисунке 2.

В соответствии с предлагаемым алгоритмом вероятность несанкционированного воздействия на КВЭ объекта может быть определена следующим выражением:

$$P_{\text{д.эл}} = P_1[P_2 + (1 - P_2)P_3(1 - P_4)]. \quad (1)$$

Тогда вероятность нарушения функционирования объекта можно выразить формулой:

$$P_{\text{возд}} = P_{\text{д.эл}} P_5. \quad (2)$$

Значения вероятностей P_1 – P_5 для конкретного объекта могут быть определены экспертным путем с учетом его места расположения, технической защищенности, специфики

КВЭ, характеристики прилегающей территории, особенностей технологического процесса, планируемых охранных (оборонных) мероприятий на данном объекте.

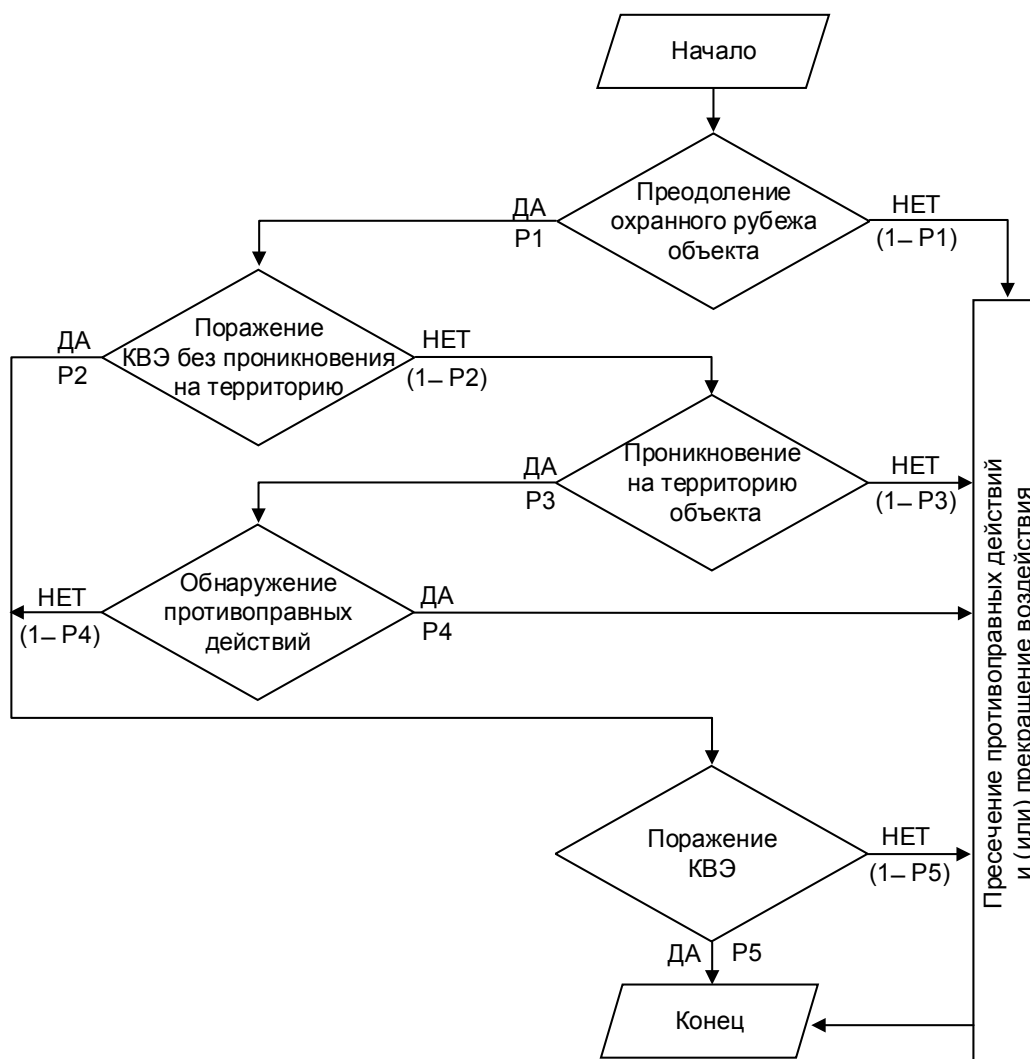


Рисунок 2. – Расчетный алгоритм диверсионно-террористического воздействия противника на объект

Определение объемов аварийно-спасательных и других неотложных работ на объекте диверсионно-террористического воздействия может проводиться на основе комплексной методики [13]. Здесь необходимо отметить, что для объективного прогнозирования возможной обстановки в интересах подготовки мероприятий гражданской обороны знания возможных объемов аварийно-спасательных и других неотложных работ только в отношении отдельно взятого объекта недостаточно. Поэтому для прогнозирования обстановки на уровне административно-территориальных единиц (согласно установленным уровням ведения ГО) представляется целесообразным использование теоретико-вероятностного подхода, при котором определение вероятностей значений прогнозных показателей осуществляется расчетными методами. Этот подход изложен в исследовании [14], где подтверждена возможность его использования при оценке и прогнозировании обстановки в интересах гражданской обороны на уровне района (города). Определение общего перечня объектов экономики и инфраструктуры, в отношении которых необходимо проводить расчеты, необходимо определять согласно постановлению⁴ с учетом военно-экономической важности таких объектов.

⁴ Об утверждении Инструкции по определению объектов, представляющих повышенную техногенную и экологическую опасность, условно уязвимых в диверсионном отношении [Электронный ресурс]: постановление МЧС Респ. Беларусь, 21 июля 2003 г., № 29; в ред. постановления МЧС Респ. Беларусь от 4 окт. 2007 г., № 82 // Консультант Плюс: Версия Проф / ООО «ЮрСпектр», Нац реестр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2020.

Заключение

Таким образом, в современных условиях гражданская оборона, как составная часть оборонных мероприятий государства, должна быть готовой выполнять свои задачи при любых вариантах развязывания агрессии с масштабным комплексным применением военной силы как в традиционных формах и традиционными способами, так и с использованием диверсионных (партизанских) и террористических методов ведения боевых действий. Для эффективного проведения мероприятий ГО необходимо в мирное время провести комплекс подготовительных мероприятий, где ключевым этапом будет выступать оценка и прогнозирование возможной обстановки, которая может сложиться в результате применения средств поражения в ходе ведения военных действий.

Предлагаемый в статье методический подход позволяет органам управления гражданской обороны получить данные для оценки и прогнозирования обстановки на соответствующем уровне ведения ГО. Результаты прогнозирования могут быть использованы для подготовки решения начальника гражданской обороны, планирования мероприятий ГО.

Перспективными в области организации гражданской обороны могут быть исследования, связанные с обоснованием мероприятий гражданской обороны по противодействию информационным вызовам и угрозам, а также исследования, связанные с обоснованием ранжирования объектов экономики в зависимости от их военно-экономической важности, обоснованием возможностей формирований гражданской обороны по проведению аварийно-спасательных и других неотложных работ различных видов, изучением особенностей применения этих формирований в различных условиях обстановки, оценкой эффективности гражданской обороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордак, С.С. Гражданская оборона в период нарастания военной угрозы / С.С. Бордак, М.Н. Субботин // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 2 (55). – С. 3–11.
2. Liddel, Hart B.H. Strategy: the Indirect Approach / Hart B.H. Liddel. – Washington: Pentagon Press, 1954. – 536 p.
3. McCarthy, R.M. Nonviolent Action: A Research Guide / R.M. McCarthy, G. Sharp. – New York: Garland Publishers, 1997. – 690 p.
4. Sharp, G. From Dictatorship to Democracy: A conceptual framework for liberation / G. Sharp. – Boston: The Albert Einstein Institution, 1994. – 72 p.
5. Creveld, M.V. The Transformation of War: The Most Radical Reinterpretation of Armed Conflict Since Clausewitz / M.V. Creveld. – New York: Free Press, 1991. – 272 p.
6. Lind, W.S. The Changing Face of War: Into the Fourth Generation / W.S. Lind, K. Nightengale, J. Schmitt, J.W. Sutton, G.I. Wilson // Marine Corps Gazette. – 1989. – P. 22–26. DOI: 10.4324/9780203089279-8.
7. Бордак, С.С. Специфика действий диверсионно-разведывательных групп противника и незаконных вооруженных формирований в период нарастания военной угрозы / С.С. Бордак // Актуальные проблемы ведения разведки, радиоэлектронной борьбы и профессиональной подготовки специалистов: Межвуз. воен.-науч. конф., Минск, 11 мая 2017 г.: тез. докл. / Воен. акад. Респ. Беларусь; ред.: А.В. Неверко [и др.]. – Минск, 2017. – С. 22–23.
8. Карпиленя, Н.В. Военная доктрина как научно-теоретическая основа совершенствования гражданской обороны / Н.В. Карпиленя, А.Д. Булва // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 2 – С. 178–194. DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3–2.178.
9. Булва, А.Д. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны и мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций в составе проектной документации / А.Д. Булва, В.А. Панасевич // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 256–268. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2–2.256.
10. Бордак, С.С. Органы управления гражданской обороны района (города): целеполагание, функции и задачи / С.С. Бордак // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 4. – С. 511–520. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.511.
11. Бордак, С.С. Подготовка мероприятий гражданской обороны на основе анализа рисков / С.С. Бордак, М.Н. Субботин // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 223–231. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.223.

12. Субботин, М.Н. Мероприятия гражданской защиты, обеспечивающие живучесть города в мирное и военное время / М.Н. Субботин, С.С. Бордак // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 99–105.
13. Кондратьев-Фирсов, В.М. Комплексная методика прогнозирования обстановки, объемов аварийно-спасательных и других неотложных работ при воздействии на объекты экономики обычными современными средствами поражения / В.М. Кондратьев-Фирсов [и др.] // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – Т. 2, № 2. – С. 49–55.
14. Шамукова, Н.В. Подготовка мероприятий гражданской обороны на основе анализа распределений прогнозных показателей возможной обстановки / Н.В. Шамукова, С.С. Бордак // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 195–205. DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.195.

**Методический подход к прогнозированию и оценке обстановки
для поддержки принятия решений по организации гражданской обороны
в условиях диверсионно-террористического воздействия**
**Methodological approach to forecasting and evaluating the situation
to support decision-making on the organization of civil defense
under the conditions of sabotage-terrorist impact**

Бордак Сергей Сергеевич

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: bordak.ucp@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9157-3899

Sergey S. Bordak

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

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: bordak.ucp@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9157-3899

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.113>

METHODOLOGICAL APPROACH TO FORECASTING AND EVALUATING THE SITUATION TO SUPPORT DECISION-MAKING ON THE ORGANIZATION OF CIVIL DEFENSE UNDER THE CONDITIONS OF SABOTAGE-TERRORIST IMPACT

Bordak S.S.

Purpose. To analyze the place and role of civil defense, taking into account the peculiarities of armed struggle in modern conditions. To propose a methodological approach to assessing and forecasting sabotage and terrorist impact on the objects of the economy, life support and infrastructure.

Methods. The known methods of formal logic, theory of operations research, theory of organization, operational-tactical calculations, historical-analytical method, general scientific (induction, deduction, analysis and synthesis) and special research methods, including methods specially developed by the author have been used for solving the problem under consideration.

Findings. The analysis of the features of modern armed confrontation, the place and role of civil defense in ensuring military security has been made. A methodological approach to assessing and forecasting sabotage and terrorist influence on objects of the economy, life support and infrastructure is proposed. The promising directions for further research in the field of civil defense organization have been identified.

Application field of research. The results of the study can be used in studies related to the organization of civil defense, in practical activities to carry out calculations necessary to support the decision-making by the head of a district (city) civil defense to carry out emergency rescue and other urgent work, as well as in the development of engineering and technical measures of civil defense and emergency prevention measures in the design documentation.

Keywords: period of increasing military threat, civil defense management bodies, emergency-and rescue operations, civil defense formations, sabotage and terrorist impact.

(The date of submitting: November 23, 2020)

REFERENCES

1. Bordak S.S., Subbotin M.N. Grahdanskaya oborona v period narastaniya voennoy ugrozy [Civil defense in a period of growing military threat]. *Bulletin of the Military Academy of Belarus*, 2017. – Vol. 55, No. 2. – Pp. 3–11. (rus)
2. Liddel Hart B.H. *Strategy: The Indirect Approach*. Washington: Pentagon Press, 1954. 536 p.
3. McCarthy R.M., Sharp G. *Nonviolent Action: A Research Guide*. New York: Garland Publishers, 1997. 690 p.
4. Sharp G. *From Dictatorship to Democracy: A conceptual framework for liberation*. Boston: The Albert Einstein Institution, 1994. 72 p.
5. Crevelde M. V. *The Transformation of War: The Most Radical Reinterpretation of Armed Conflict Since Clausewitz*. New York: Free Press, 1991. 272 p.
6. Lind W.S., Nightengale K., Schmitt J., Sutton J.W., Wilson G.I. The Changing Face of War: Into the Fourth Generation. *Marine Corps Gazette*, 1989. Pp. 22–26. DOI: 10.4324/9780203089279-8.
7. Bordak S.S. Spetsifika deystviy diversionno-razvedyvatel'nykh grupp protivnika i nezakonnykh voornozhennykh formirovaniy v period narastaniya voennoy ugrozy [Specificity of the actions of mobile groups and armed formations during the period of growing military threat]. *Proc. military scientific conf. «Aktual'nye problemy vedeniya razvedki, radioelektronnoy bor'by i professional'noy podgotovki spetsialistov»*, Minsk, May 11, 2017. The Military Academy of Belarus. Ed. by: A.V. Neverko et al. Minsk, 2017. Pp. 22–23. (rus)
8. Karpilenya N.V., Bulva A.D. Voennaya doktrina kak nauchno-teoreticheskaya osnova sovershenstvovaniya grahdanskoy oborony [Military doctrine as a scientific and theoretical basis for the improvement of civil defense]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 2. Pp. 178–194. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.178.
9. Bulva A.D., Panasevich V.A. Inzhenerno-tekhicheskie meropriyatiya grahdanskoy oborony i meropriyatiya po preduprezhdeniyu chrezvychaynykh situatsiy v sostave proektnoy dokumentatsii [Engineering and technical activities of civil defense and emergency prevention activities in the composition of design documentation]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 256–268. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.256.

10. Bordak S.S. Organy upravleniya grazhdanskoy oborony rayona (goroda): tselepolaganie, funktsii i zadachi [Civil defense regional governing bodies: goals, functions and tasks]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 4. Pp. 511–520. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.511.
11. Bordak S.S., Subbotin M.N. Podgotovka meropriyatiy grazhdanskoy oborony na osnove analiza riskov [Preparation of actions of civil defense on the basis of risk analysis]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 2. Pp. 223–231. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.223.
12. Subbotin M.N., Bordak S.S. Meropriyatiya grazhdanskoy zashchity, obespechivayushchie zhivuchest' goroda v mirnoe i voennoe vremya [Measures of the Civil Defense providing the functioning of cities at peace and war period]. *Vestnik Komandno-inzhenemogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 99–105. (rus)
13. Kondrat'ev-Firsov V.M., Malyshev V.P., Turko S.I., Shevchenko A.V. Kompleksnaya metodika prognozirovaniya obstanovki, ob"emov avariyno-spasatel'nykh i drugikh neotlozhnykh rabot pri vozdeystvii na ob"ekty ekonomiki obychnymi sovremennymi sredstvami porazheniya [Comprehensive methodology for predicting the situation, scope of rescue and other urgent work on economic objects exposed to conventional modern means of destruction]. *Civil protection strategy: problems and research*, 2012. Vol. 2, No. 2. Pp. 49–55. (rus)
14. Shamukova N.V., Bordak S.S. Podgotovka meropriyatiy grazhdanskoy oborony na osnove analiza raspredeleniy prognoznykh pokazateley vozmozhnoy obstanovki [Preparation of civil defense measures based on an analysis of the distributions of predictive indicators of a possible situation]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 2. Pp. 195–205. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.195.

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.124>

УДК 796.012.116:614.8

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ СИЛОВОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ НАВЫКОВ В ПОЖАРНОЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ

Самсоник А.Р., Чумила Е.А., Демьянов В.В., Попко Е.Р.

Цель. Разработка и обоснование комплекса физических упражнений, способствующих формированию профессиональных навыков и развитию силовой выносливости обучающихся Университета гражданской защиты МЧС Беларуси.

Методы. Изучение, анализ и обобщение научно-методической литературы, педагогическое наблюдение, контрольно-педагогические испытания, математико-статистическая обработка результатов исследования.

Результаты. Разработаны комплексы специальных физических упражнений, способствующие развитию силовой выносливости и формированию профессиональных навыков при работе с отдельными видами пожарно-технического вооружения. Проведен констатирующий и формирующий педагогический эксперимент, направленный на определение эффективности комплекса специальных физических упражнений. Представлена характеристика и методические рекомендации по выполнению комплекса специальных физических упражнений, направленных на развитие силовой выносливости. Проведена математико-статистическая обработка полученных данных с целью установления взаимосвязи между физической нагрузкой силовой направленности и профессиональной выносливостью при работе с отдельными видами пожарно-технического вооружения.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть использованы в образовательном процессе учреждений образования МЧС Республики Беларусь и иностранных государств, а также при организации занятий по профессиональной подготовке со спасателями-пожарными подразделений МЧС.

Ключевые слова: профессиональная выносливость, спасатель-пожарный, физическая нагрузка, силовая выносливость, пожарно-техническое вооружение.

(Поступила в редакцию 12 октября 2020 г.)

Введение

Основными системообразующими факторами, определяющими направленность и особенности использования прикладной физической подготовки в процессе становления спасателя-пожарного, являются условия, формы и характер трудовых операций, а также особенности режима труда и отдыха. Эффективность их реализации при подготовке спасателей-пожарных возможна лишь при комплексном детальном изучении специфических особенностей и требований, которые включают формирование и доведение до необходимого уровня совершенства профессионально-прикладных умений и навыков, в том числе при работе с пожарно-техническим вооружением (далее – ПТВ) и аварийно-спасательным оборудованием (далее – АСО).

Анализ литературы показывает, что профессия спасателя-пожарного имеет специфические особенности, основными из которых являются высокий уровень опасности, стрессогенности и ответственности, рискованность, неопределенность ситуации, действия в условиях ограниченного пространства и дефицита времени. Успешное решение многих задач во время выполнения аварийно-спасательных работ в экстремальных условиях внешней и внутренней среды требует высокого уровня развития профессионально важных качеств, особое место среди которых, по мнению ряда авторов, занимает силовая выносливость [1; 2].

Основным образовательным звеном в Республике Беларусь по подготовке специалистов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, формированию у них профессионально важных качеств является Университет гражданской защиты МЧС Беларуси (далее – Университет).

Предпосылки к проведению исследования. Особое значение в рамках реализации образовательного процесса в Университете по направлению специальности образования «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» отводится изучению дисциплин оперативно-тактической и профессионально прикладной направленности, к числу которых

относятся «Пожарная аварийно-спасательная подготовка» и «Работа с ПТВ и АСО». Изучение данных дисциплин направлено на формирование у обучающихся профессионально важного двигательного фонда и решения комплекса задач. Основные из них:

- обеспечение системного формирования и доведения до необходимой степени совершенства профессионально-прикладных умений и навыков;
- совершенствование физической и специальной подготовки;
- формирование качеств, обусловленных спецификой профессиональной деятельности.

Использование компетентностного подхода, занимающего особую роль в Болонском процессе, направлено на формирование профессиональных компетенций при изучении указанных дисциплин и реализуемых при выполнении комплекса специальных работ в условиях ликвидации чрезвычайных ситуаций с использованием ПТВ, АСО, подъемных механизмов и спасательно-страхующих устройств. Залогом высокого уровня профессиональной подготовленности спасателя-пожарного являются его физическое развитие и физическая подготовленность, способствующие созданию условий для становления профессионального мастерства, определяемого степенью формирования профессиональных двигательных умений и навыков владения ПТВ и АСО, а также выполнения работ на высоте. На этом фундаменте развиваются и реализуются необходимые качества спасателей-пожарных и формируются их теоретические знания, позволяющие применять правильную тактику действий при ликвидации чрезвычайных ситуаций различного характера.

Важный критерий, определяющий готовность спасателей-пожарных к успешному выполнению боевых задач, – показатели выполнения контрольных упражнений регламентированных Нормативами по пожарной аварийно-спасательной подготовке и боевому развертыванию для работников органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, которые утверждены приказом МЧС Республики Беларусь «Об организации физической и пожарной аварийно-спасательной подготовки в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь». Контрольные упражнения и нормативные требования к ним не являются инструментом тотальной диагностики профессиональной физической подготовленности спасателей-пожарных и разрабатываются с учетом внедрения современных методик и подходов при ликвидации чрезвычайных ситуаций. Большинство используемых упражнений требует продолжительного выполнения двигательных действий силового характера, где особое место отводится метрологическому подходу, основанному на измерении и контроле показателей, которые нельзя полноценно применить к такому профессиональному качеству, как выносливость [3].

В связи с этим актуальным направлением исследования является разработка и обоснование комплекса упражнений специальной направленности и выявление логической и эмпирической связи между систематическими силовыми нагрузками и выносливостью.

Характеристика выносливости и подходы к ее определению. Повседневная профессиональная деятельность спасателя-пожарного требует определенного уровня физической подготовленности, под которой принято понимать отдельные качественные стороны различных двигательных способностей человека или отдельных его действий. Их уровень определяется физическими и психическими факторами. Оптимальное развитие физических качеств напрямую связано с оптимальной работоспособностью человека.

Отражением общего уровня работоспособности является такое важное физическое качество, как выносливость. При работе в экстремальных условиях данное качество выступает ведущим по отношению к другим профессионально значимым качествам и проявляется в той или иной степени при нагрузках различной интенсивности. Выносливость – это многофункциональное свойство человеческого организма, оно объединяет большое количество биохимических процессов. Единого показателя измерения выносливости во всем диапазоне доступных человеку нагрузок, как показывают результаты исследований, не существует. Это связано с тем, что при различных физических нагрузках работают различные энергетические механизмы.

Выносливость отражает уровень работоспособности человека и при выполнении физической работы проявляется в двух основных формах:

- в продолжительности работы без признаков утомления при заданном уровне мощности выполняемой работы;
- скорости снижения работоспособности при наступлении утомления [4].

Различают общую и специальную (профессиональную) выносливость. Общая выносливость характеризуется возможностями организма выполнять различные физические

нагрузки невысокой интенсивности в течение длительного времени. Профессиональная выносливость понятие многокомпонентное, уровень ее развития зависит:

- от общей выносливости;
- скоростных возможностей спасателя-пожарного;
- силовых качеств;
- технико-тактического мастерства и волевых качеств [5; 6].

Спасатель-профессионал должен выполнить поставленную задачу при любых внешних условиях и обстановке. Поэтому при проведении практических занятий основное внимание обращается:

- на приобретение устойчивых навыков работы с ПТВ и АСО и выполнение работ на высоте;
- расширение, с учетом приобретаемого опыта, диапазона применяемых спасательных технологий;
- повышение физической и психологической подготовки;
- доведение приемов и способов работы до автоматизма с учетом правильности принимаемых решений;
- накопление разнообразных умений;
- совершенствование рабочей скоростной выносливости в любых возможных экстремальных условиях;
- соблюдение правил и мер безопасности при проведении поисковых и аварийно-спасательных работ.

Организация образовательного процесса в Университете включает общеинженерную, физическую и профессиональную подготовку будущих спасателей-пожарных. Интенсивность специальных профессиональных физических нагрузок ациклична. Следствием этого является непостоянный характер проявления выносливости при выполнении приемов и упражнений с ПТВ и АСО.

Практические умения и навыки при работе с основными видами ПТВ и АСО являются важными квалификационными характеристиками профессии спасатель-пожарный. На занятиях по пожарной аварийно-спасательной подготовке обучающиеся Университета получают, отрабатывают и закрепляют квалификационные знания, умения и навыки. Успех образовательного процесса напрямую зависит от профессионально-прикладной физической подготовки.

Общая физическая подготовка позволяет обучающимся проходить текущий метрологический контроль в виде нормативов по упражнениям и приемам с ПТВ и АСО без дополнительных экстремальных нагрузок. Профессионально-прикладная физическая подготовка базируется на синтезе общей физической подготовки с профессиональной выносливостью. Оценку уровня выносливости допускается производить на основании различных показателей. Они могут быть разделены:

- на основные, которые оцениваются по предельному времени, в течение которого может производиться работа;
- дополнительные, которые оцениваются по времени удержания работоспособности на требуемом уровне;
- косвенные.

Эмпирическая информативность о состоянии и динамике выносливости по профессионально-прикладной физической подготовке нами оценивалась по основному показателю – метрологическим данным выполнения приемов и упражнений в экстремальных условиях и при дополнительных нагрузках.

Описание упражнений по развитию силовой выносливости. Изучение механизмов воздействия упражнений профессионально-прикладной направленности на организм обучающихся, а также обобщение мнений специалистов в области профессионально-прикладной физической подготовки обучающихся учебных заведений силовых структур позволило работникам кафедры пожарной аварийно-спасательной подготовки Университета разработать комплекс упражнений по развитию силовой выносливости (табл. 1). Упражнения, входящие в состав комплекса, направлены на повышение силовых возможностей организма и развитие основных групп мышц.

Разработка подходов по повышению профессиональной выносливости обучающихся Университета основана на корреляции интенсивности силовой физической нагрузки.

Таблица 1. – Комплекс упражнений по развитию силовой выносливости

Наименование упражнения	Тренируемые физические качества	Преимущественное энергообеспечение	ЧСС при выполнении, уд/мин	Рекомендуемое кол-во повторений	Рекомендуемое кол-во подходов
Попеременное поднимание гантель на бицепс	Силовая выносливость	Аэробно-анаэробное	140–160	Максимально возможное	2–3
Выпрыгивания вверх из положения полуприседа	Силовая выносливость	Аэробно-анаэробное	150–180	50–70	4–5
Подтягивание на высокой перекладине	Сила	Аденозинтрифосфатное анаэробное	140–160	Максимально возможное	2–3
Поднимание туловища из положения лежа на спине	Силовая выносливость	Аэробное	160–180	Максимально возможное	1

Порядок выполнения упражнений:

1. Попеременное поднимание гантель на бицепс.

Выполняется с отягощением 2,5–5 кг из положения стоя или сидя.

Взять в каждую руку по снаряду нейтральным хватом (ладони направлены друг к другу). Свободно опустить руки с гантелями по бокам корпуса. На выдохе изолированным усилием мышц руки поднять одну гантель в направлении плеча, доводя ее до линии груди. Выдержать небольшую паузу в верхней точке амплитуды и возвратить снаряд в исходное положение, сохраняя в локте небольшой угол. На вдохе совершить движение по заданному алгоритму для другой руки.

2. Выпрыгивания вверх из положения полуприседа.

Поставить ноги на ширине плеч и выпрямить спину, руки скрестить перед собой на уровне груди. На вдохе сделать полуприсед, на выдохе мощно выпрыгнуть вверх, оттолкнувшись полными ступнями. После того как стопы полностью коснулись пола, снова вернуться в положение полуприседа.

3. Подтягивание на высокой перекладине.

Выполняется из виса на прямых руках хватом сверху (положение виса неподвижное). Подтянуться без маховых и рывковых движений, при подтягивании подбородок должен быть выше грифа перекладины. Допускается незначительное сгибание, разведение ног.

4. Поднимание туловища из положения лежа на спине.

Выполняется на гимнастическом мате из положения лежа на спине. Ноги согнуты в коленях до угла 90° и зафиксированы, руки за головой, пальцы «в замке» на затылке. Поднимая туловище и наклоняясь вперед, коснуться локтями коленей и возвратиться в исходное положение до касания лопатками поверхности, вернуться в исходное положение. Допускается незначительное разведение ног. Упражнение выполняется с умеренной интенсивностью.

Методика формирования профессиональных навыков и развития силовой выносливости на основе использования комплекса специальных упражнений базируется на применении метода повторных усилий. Использование метода наиболее эффективно на начальном этапе обучения, поскольку позволяет постепенно увеличивать объем и интенсивность силовой нагрузки, минимизировать вероятность получения травм, контролировать технику выполнения упражнений.

В процессе обучения предполагается осуществление контроля за уровнем развития физических качеств, состоянием функциональных систем организма, владением техникой выполнения профессиональных технических действий.

Организация эксперимента. В исследовании приняли участие 99 курсантов 4-го курса Университета (50 человек в контрольной группе и 49 человек в экспериментальной группе). Главной особенностью занятий, которые проводились с обучающимися экспериментальной группы, являлось использование методики, основанной на выполнении комплекса упражнений по развитию силовой выносливости. Исследования проводились в течение 2019/2020 учебного года.

Цель проведения эксперимента заключалась в определении эффективности влияния методики, основанной на применении комплекса упражнений по развитию силовой выносливости на уровень профессионально-прикладной физической подготовленности обучающихся Университета. Влияние комплекса упражнений на формирование профессиональных навыков оценивалось на основе выполнения упражнения «Сматывание магистральной рукавной линии из двух напорных пожарных рукавов диаметром 77 мм "восьмеркой" на руки» в рамках изучения дисциплины «Работа с ПТВ и АСО».

В эксперименте, организованном на базе Университета, проводились контрольные занятия для получения начальных (в начале эксперимента) и итоговых (в конце эксперимента) результатов.

Контрольная группа занималась по общепринятой методике в соответствии с учебными программами «Пожарная аварийно-спасательная подготовка», «Работа с ПТВ и АСО», «Физическая подготовка», с обучающимися экспериментальной группы были организованы дополнительные занятия с использованием комплекса упражнений по развитию силовой выносливости (табл. 1). Занятия проводились во время управляемой самостоятельной работы и другое свободное от учебы время. За период эксперимента с каждым обучающимся экспериментальной группы проведено не менее 60 занятий продолжительностью 30 мин каждое.

Результаты контрольных занятий представлены на рисунках 1–2.

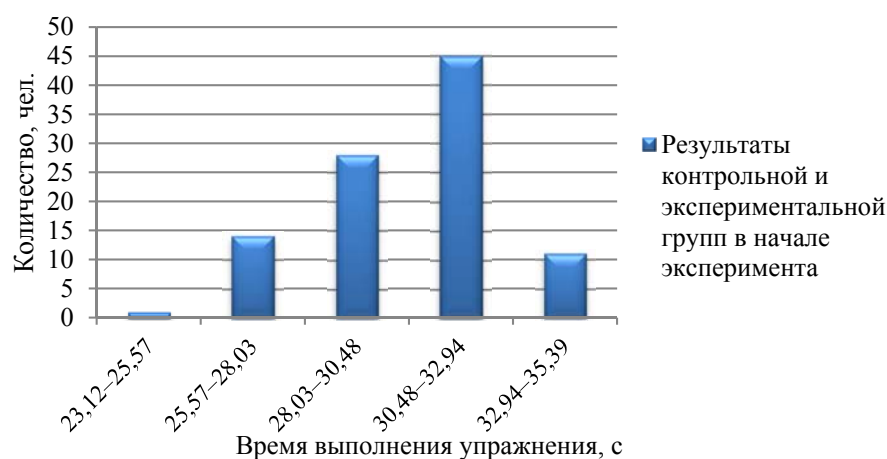


Рисунок 1. – Результаты выполнения контрольного упражнения «Сматывание магистральной рукавной линии из двух напорных пожарных рукавов диаметром 77 мм "восьмеркой" на руки» обучающимися контрольной группы в начале эксперимента

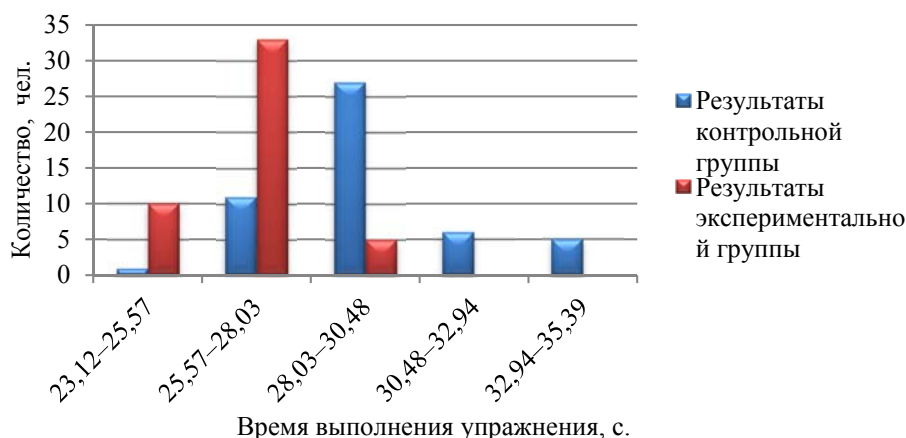


Рисунок 2. – Результаты выполнения контрольного упражнения «Сматывание магистральной рукавной линии из двух напорных пожарных рукавов диаметром 77 мм "восьмеркой" на руки» обучающимися контрольной и экспериментальной группы в конце эксперимента

Графическое представление результатов эксперимента наглядно демонстрирует улучшение результатов экспериментальной группы по времени выполнения упражнения. Улучшение скоростных характеристик в экстремальных условиях (в боевой одежде и снаряжении и с дыхательным аппаратом на сжатом воздухе) свидетельствует о повышении уровня профессиональной выносливости.

Результаты, полученные в период исследований, обрабатывались методом математической статистики и анализа.

Обобщение числовых характеристик, полученных в конце эксперимента, было выполнено с помощью инструмента описательной статистики. Описательная статистика эксперимента демонстрирует улучшение среднего времени выполнения упражнения и размаха по времени.

Подтверждением экспериментальных результатов стала проверка числовых характеристик статистическими методами. По данным эксперимента была проведена проверка гипотезы H_0 о равенстве дисперсий контрольной и экспериментальной групп $D_x = D_y$ при альтернативной гипотезе $H_1 D_x \neq D_y$. Наблюдаемое значение критерия Фишера составило $F_{\text{наб}} = s_1^2/s_2^2 = 4,49/1,892 = 2,378$ при числе степеней свободы $f_1 = n_y - 1 = 49$, $f_2 = n_x - 1 = 48$. По таблице критических точек распределения Фишера – Снедекора при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и данным числам степеней свободы критическое значение оказалось равным $F_{\text{кр}}(49; 48) = 1,53$. Так как $F_{\text{набл}} > F_{\text{кр}}$, есть основания отвергнуть нулевую гипотезу, значит, можно считать, что дисперсии двух выборок различны. По t -критерию Стьюдента проведена проверка гипотезы о равенстве генеральных средних при числе степеней свободы $f_1 = n_y + n_x - 2 = 50 + 49 - 2 = 97$ на уровне значимости $\alpha = 0,05$. По таблице распределения Лапласа $t_{\text{кр}} = 1,96$, по данным эксперимента значение статистики равно $t_{\text{набл}} = 8,56$, т.к. экспериментальное значение критерия t попало в критическую область и $t_{\text{набл}} > t_{\text{кр}}$ нулевая гипотеза отклоняется в пользу альтернативной. Генеральные средние двух выборок не равны. Результаты проведенных расчетов говорят о том, что уровень достигнутых результатов экспериментальной группой является достаточным, поэтому тренировочную нагрузку можно принять за оптимальную.

Заключение

В результате проведения педагогического эксперимента по определению связи между силовой физической нагрузкой и профессиональной выносливостью при работе с отдельными видами ПТВ были получены и проанализированы результаты времени выполнения упражнения «Сматывание магистральной рукавной линии из двух напорных пожарных рукавов диаметром 77 мм "восьмеркой" на руки» обучающимися контрольной и экспериментальной группы. Результаты эксперимента позволили обосновать эффективность использования в образовательном процессе Университета комплекса упражнений по развитию силовой выносливости для повышения уровня профессионально-прикладной физической подготовленности. Коррекция интенсивности силовой физической нагрузки при выполнении физических упражнений в рамках управляемой самостоятельной работы является обоснованным подходом повышения профессиональной выносливости спасателя-пожарного.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калицкий, Э.М. Современная концепция профессионализма / Э.М. Калицкий, Н.Г. Гончарик // Адукацыя і выхаванне. – 2002. – № 10. – С. 19–26.
2. Чумила, Е.А. Совершенствование профессионально-прикладной физической подготовки курсантов учебных заведений МЧС Республики Беларусь / Е.А. Чумила // Мир спорта. – 2015. – № 2. – С. 41–47.
3. Аварийно-спасательная подготовка: учебник / Э.Р. Бариев [и др.]; под ред. Э.Р. Бариева. – Минск: ИВЦ Минфина, 2014. – 315 с.
4. Зациорский, В.М. Физические качества спортсмена: основы теории и методики воспитания / В.М. Зациорский. – Изд. 3-е. – М.: Советский спорт, 2009. – 200 с.
5. Земляков, В.Е. К вопросу определения работоспособности и специальной выносливости в циклических видах спорта / В.Е. Земляков // Теория и практика физической культуры. – 1990. – № 7. – С. 36–39.
6. Сокунова, С.Ф. Контроль за уровнем развития выносливости спортсменов / С.Ф. Сокунова // Теория и практика физической культуры. – 2002. – № 8. – С. 56–59.

**Эмпирическая обусловленность силовой физической нагрузки и выносливости
при формировании профессиональных навыков в пожарной
аварийно-спасательной подготовке**

**Empirical conditionality of physical load and endurance
in the fire and rescue professional skills training**

Самсоник Андрей Ростиславович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной подготовки,
начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: samsonik.a@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-5647-9693

Andrey R. Samsonik

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Rescue and Firefighting Training,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: samsonik.a@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-5647-9693

Чумила Евгений Анатольевич

кандидат педагогических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра физической
подготовки и спорта, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: cchhuumm@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5551-4215

Evgeniy A. Chumila

PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Physical Training and Sports,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: cchhuumm@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5551-4215

Демьянов Владимир Владимирович

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: vladimirdemanov1@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9651-9429

Vladimir V. Dem'yanov

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

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: vladimirdemanov1@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9651-9429

Попко Елизавета Руслановна

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: liza0106popko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7862-3254

Elizaveta R. Popko

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

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: liza0106popko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7862-3254

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.124>

EMPIRICAL CONDITIONALITY OF PHYSICAL LOAD AND ENDURANCE IN THE FIRE AND RESCUE PROFESSIONAL SKILLS TRAINING

Samsonik A.R., Chumila E.A., Dem'yanov V.V., Popko E.R.

Purpose. Development and substantiation of a set of physical exercises contributing to the formation of professional skills and development of strength endurance of students of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus.

Methods. Study, analysis and generalization of scientific and methodological literature, pedagogical observation, control and pedagogical tests, mathematical and statistical processing of research results.

Findings. Complexes of special physical exercises have been developed that contribute to the development of strength endurance and formation of professional skills when working with certain types of fire-fighting equipment. An ascertaining and formative pedagogical experiment aimed at determining the effectiveness of a complex of special physical exercises was carried out. The characteristics and methodological recommendations for the implementation of a set of special physical exercises aimed at developing strength endurance are presented. The mathematical and statistical processing of obtained data was carried out in order to establish the relationship between the physical load of power orientation and professional endurance when working with certain types of fire-fighting equipment.

Application field of research. The research results can be used in training process of educational institutions of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus and foreign countries, as well as in organizing vocational training classes with rescuers-firefighters of the Ministry of Emergency Situations.

Keywords: professional endurance, rescuer-firefighter, physical activity, power endurance, fire-fighting equipment.

(The date of submitting: October 12, 2020)

REFERENCES

1. Kalitskiy E.M., Goncharik N.G. Sovremennaya kontseptsiya professionalizma [Modern concept of professionalism]. *Adukatsyya i vykhavanne*, 2002. No. 10. – Pp. 19–26. (rus)
2. Chumila E.A. Sovershenstvovanie professional'no-prikladnoy fizicheskoy podgotovki kursantov uchebnykh zavedeniy MChS Respubliki Belarus' [Improvement of professionally applied physical training of cadets of educational institutions of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus]. *Mir sporta*, 2015. No. 2. – Pp. 41–47. (rus)
3. Bariev E.R. [et al.] *Avariyno-spasatel'naya podgotovka* [Emergency and rescue training]: textbook. Minsk: IVTs Minfina, 2014. 316 p. (rus)
4. Zatsiorskiy V.M. *Fizicheskie kachestva sportsmena: osnovy teorii i metodiki vospitaniya* [Physical qualities of an athlete: the foundations of the theory and methods of education]. Moscow: Sovetskiy sport, 2009. 200 p. (rus)
5. Zemlyakov V.E. K voprosu opredeleniya rabotosposobnosti i spetsial'noy vynoslivosti v tsiklicheskikh vidakh sporta [To the question of determining working capacity and special endurance in cyclic sports]. *Theory and Practice of Physical Culture*, 1990. No. 7. Pp. 36–39. (rus)
6. Sokunova S.F. Kontrol' za urovnem razvitiya vynoslivosti sportsmenov [Monitoring the level of development of endurance athletes]. *Theory and Practice of Physical Culture*, 2002. No. 8. Pp. 56–59. (rus)

**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 нормативно-техническим документам, справочные материалы и т. п.

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

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

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

5. Материал статьи излагается в следующем порядке:

1) информация об авторах (на отдельном листе): фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, ученое звание, место работы (полное название, адрес с указанием индекса и страны), должность, рабочий телефон, e-mail (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:

1-94 01 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:

1-94 02 73 «Ликвидация чрезвычайных ситуаций и гражданская оборона» с присвоением квалификации «Инженер по безопасности». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

1-94 02 72 «Инжиниринг безопасности объектов строительства» с присвоением квалификации «Инженер по безопасности». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

1-94 02 71 «Промышленная безопасность» с присвоением квалификации «Инженер по промышленной безопасности». Срок обучения – 18 месяцев. Форма обучения – заочная (три сессии).

1-59 01 06 «Охрана труда в отраслях непроизводственной сферы» с присвоением квалификации «Специалист по охране труда». Срок обучения – 19 месяцев. Форма обучения – заочная (четыре 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»;
- «Экспертная деятельность» для работников проектных организаций;
- «Экспертная деятельность» для работников органов и подразделений по ЧС;
- «Пожарная безопасность. Предупреждение чрезвычайных ситуаций. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем автоматической пожарной сигнализации, систем автоматического пожаротушения, систем противодымной защиты, систем передачи извещений, систем оповещения о пожаре и управления эвакуацией» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Проектирование систем автоматической пожарной сигнализации, систем автоматического пожаротушения, систем противодымной защиты, систем передачи извещений, систем оповещения о пожаре и управления эвакуацией» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Лица, осуществляющие капитальный ремонт (перезарядку) огнетушителей, торговлю средствами противопожарной защиты» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (инженерно-технические работники)» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах Республики Беларусь» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах с массовым пребыванием людей» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Промышленная безопасность» (заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Радиационная безопасность, радиационный контроль» (для лиц, ответственных за радиационную безопасность, радиационный контроль в организациях медицинского профиля) (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Радиационная безопасность, радиационный контроль» (для лиц, ответственных за радиационную безопасность, радиационный контроль на промышленных предприятиях и в научных учреждениях) (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Основы обеспечения ядерной и радиационной безопасности» (для лиц, участвующих в обеспечении ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации объектов использования атомной энергии) (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);

- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Охрана труда» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Защита от ЧС» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Противодействие коррупции» (заочная (дистанционная) форма обучения).

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

- «Монтаж, наладка и техническое обслуживание систем автоматической пожарной сигнализации, систем автоматического пожаротушения, систем противодымной защиты, систем передачи извещений, систем оповещения о пожаре и управления эвакуацией» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Техническое обслуживание систем пожарной автоматики»;
- «Выполнение работ с применением огнезащитных составов (исполнители работ)» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Обеспечение пожарной безопасности на объектах с массовым пребыванием людей»;
- «Защита от ЧС» (очная/заочная (дистанционная) форма обучения);
- «Пожарно-технический минимум».

Семинары по образовательным программам:

- «Оказание первой помощи пострадавшим в чрезвычайных ситуациях»;
- «Расчет предела огнестойкости (железобетонных, металлических, деревянных, каменных строительных конструкций»;
- «Расчет времени эвакуации людей при пожаре»;
- «Расчет температурного режима пожара в помещении»;
- «Расчет величины противопожарных разрывов между зданиями, сооружениями и наружными установками»;
- «Расчет площади легкосбрасываемых конструкций»;
- «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»;
- «Порядок проектирования пассивной противопожарной защиты зданий различного назначения»;
- «Оптимизация затрат на обеспечение требований пожарной безопасности на основании расчетных методов»;
- «Порядок подготовки организации к пожарно-техническому обследованию»;
- «Охрана труда в организациях непроизводственной 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/заочная (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,
тел/факс: (017) 340-71-89 (ФЗО), тел.: (017) 340-69-55, факс: (017) 340-35-58 (ФБЖ).

Дополнительная информация размещена на сайте университета: <http://ucp.by>.

Научный журнал

Вестник
Университета гражданской защиты МЧС Беларуси
Том 5, № 1, 2021

Подписано в печать 23.02.2021.
Формат 60х84 1/8.
Бумага офсетная. Цифровая печать.
Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 15,69. Уч.-изд. л. 14,49.
Тираж 110 экз. Заказ 010-2021.

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.