

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.251>

УДК 614.895.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КЛАССА В ПЕНОЙ НИЗКОЙ КРАТНОСТИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ РОЗЕТОЧНЫМИ ОРОСИТЕЛЯМИ

Лихоманов А.О., Камлюк А.Н., Грачулин А.В.

Цель. Установить взаимосвязь между кратностью и устойчивостью воздушно-механической пены (пены) низкой кратности, генерируемой в розеточных оросителях для автоматических установок пожаротушения, а также разработать методику и провести натурные испытания пенных и водопенных оросителей, на основании результатов которых выполнить сравнительную оценку эффективности тушения пеной, генерируемой каждым из них.

Методы. Метод регрессионного анализа применен для установления формы зависимости устойчивости пены от ее кратности. Оценка эффективности тушения пеной, генерируемой оросителями, выполнялась экспериментальным путем, а обработка полученных экспериментальных данных выполнялась с использованием метода оценивания и выражения неопределенности измерений.

Результаты. Установлена линейная взаимосвязь между кратностью K и устойчивостью C воздушно-механической пены низкой кратности, которая имеет общий вид: $C = \gamma K$, где γ – эмпирический коэффициент, зависящий от физико-химических свойств пенообразователя. Получена эмпирическая зависимость $C = f(K)$ для пенообразователя ПО-6РЗ (6 %). Разработана методика и проведены натурные испытания четырех розеточных оросителей: оросителя V2 с оптимальной по кратности пены геометрией, ТУ 3251 (США), ДПУ-15 (Россия) и ДВН-11 (Беларусь). Для сравнения эффективности тушения пеной, генерируемой оросителями, применен показатель эффективности тушения E_t , учитывающий время тушения модельного очага пожара и расход огнетушащего вещества. В результате натурных испытаний установлено, что пена, генерируемая оросителем V2, обладает не менее чем в 2,5 раза большей огнетушащей эффективностью по сравнению с остальными испытанными оросителями.

Область применения исследований. Установленная эмпирическая зависимость $C = \gamma K$ может быть использована для прогнозирования устойчивости пены на основе значения ее кратности и наоборот. Разработанные методики натурных испытаний и оценки эффективности тушения пеной, генерируемой пенными и водопенными розеточными оросителями, могут быть применены при разработке отечественных ТНПА в данной области, а также для исследования иных оросителей в условиях, приближенных к реальному пожару.

Ключевые слова: кратность пены, устойчивость пены, дисперсность пены, эффективность тушения, время тушения, расход огнетушащего вещества, автоматическая установка пожаротушения, ороситель, натурные испытания.

(Поступила в редакцию 25 июня 2020 г.)

Введение

Эффективность тушения пожара пеной, генерируемой пенными и водопенными розеточными оросителями автоматических установок пожаротушения (АУП), напрямую связана с такими ее качественными характеристиками, как кратность и устойчивость [1]. Под устойчивостью пены C понимается ее способность сохранять свои исходные свойства. После того как пена была сгенерирована, на нее воздействует ряд разрушающих физико-химических процессов. Нормативно закреплен метод определения устойчивости пены, который заключается в определении времени разрушения половины ее объема либо времени выделения из

нее 50 % жидкости¹. Под кратностью пены K понимается величина, равная отношению объема пены к объему раствора пенообразователя, содержащегося в ней [2]. Иными словами, кратность указывает на количество газовой фазы в пене, соответственно, чем больше кратность, тем больше в ней газа и тем она легче. Различают пены низкой (от 3 до 20), средней (20–200) и высокой (более 200) кратности [2].

Повышение эффективности тушения пеной, генерируемой пенными и водопенными розеточными оросителями, является весьма актуальной задачей по причине активного роста числа объектов, которые необходимо защищать пенными АУП. Повышение эффективности тушения пожара заключается в сокращении времени тушения и расхода огнетушащего вещества (ОТВ). Рациональным решением поставленной задачи является повышение качественных характеристик генерируемой оросителями пены.

Основная часть

Зависимость кратности и устойчивости пены друг от друга. В работе [3] обнаружено, что зависимости кратности и устойчивости пены, генерируемой из рабочего раствора пенообразователя ПО-6РЗ (6 %), от геометрических параметров дужек и розетки оросителя имеют схожий вид и пропорциональны друг другу в силу одинаковых условий пеногенерирования. Сопоставив полученные экспериментальные значения кратности пены и соответствующие им значения устойчивости, получили график зависимости данных качественных характеристик друг от друга (рис. 1).

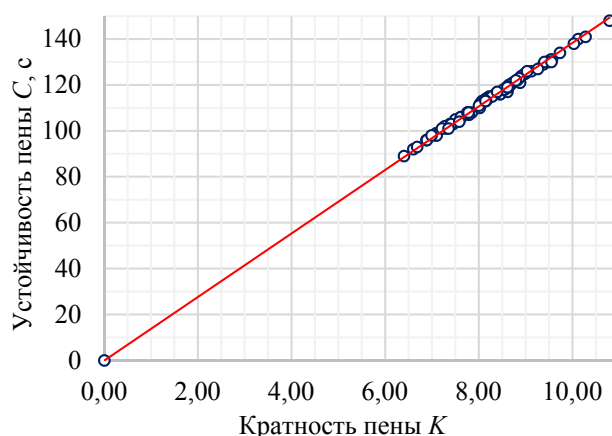


Рисунок 1. – Зависимость устойчивости пены от ее кратности

Из рисунка 1 видно, что зависимость C от K имеет линейный вид, при этом формуле линии тренда (прямая линия) соответствует коэффициент детерминации $R^2 = 0,99$, что свидетельствует о высокой степени соответствия экспериментальным значениям. В связи с этим зависимость C от K для пены низкой кратности (т. е. при $K < 20$) можно выразить следующим образом:

$$C = \gamma K, \quad (1)$$

где γ – эмпирический коэффициент, зависящий от физико-химических свойств пенообразователя, с.

Для пенообразователя ПО-6РЗ (6 %) при условии, что устойчивость пены определяется как время выделения из нее 25 % жидкой фазы (раствора пенообразователя), выражение (1) принимает вид:

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.

$$C = 13,84K. \quad (2)$$

Выражение (1) может использоваться и для других пенообразователей при наличии экспериментальных данных для определения соответствующего коэффициента γ .

Таким образом, по причине линейной зависимости устойчивости пены от ее кратности последняя качественная характеристика выбрана в качестве основной. По численному значению кратности пены при необходимости можно перейти к другим качественным характеристикам. Кроме того, только кратность пены регламентируется действующими в Беларуси техническими нормативными правовыми актами (ТНПА) и указывается производителями в технической документации на розеточные оросители.

Для повышения кратности пены, генерируемой розеточным оросителем, в работе [3] проведен комплекс экспериментальных исследований по влиянию геометрических параметров дужек и розетки оросителя на данную качественную характеристику. С помощью разработанной на основе полученных данных экспериментально-статистической математической модели проведена оптимизация и получены значения геометрических параметров элементов оросителя V2 (длина дужек $L = 114 \pm 4$ мм, коэффициент рабочей поверхности розетки $K_s = 87 \pm 2$ %, внешний диаметр розетки $D = 63 \pm 3$ мм и угол конусности лопастей розетки $\alpha = 36 \pm 1^\circ$), при которых кратность пены теоретически может достичь наибольшего значения $K_{\text{теор}} = 11,7 \pm 0,4$. Ороситель V2 (рис. 2) испытан в аккредитованной испытательной лаборатории. В рамках данных испытаний получено значение кратности генерируемой оросителем V2 пены $K_{\text{эсп}} = 13,6 \pm 0,2$ [4], что как минимум на 70 % больше по сравнению с применяемыми на данный момент пенными и водопенными оросителями розеточного типа.

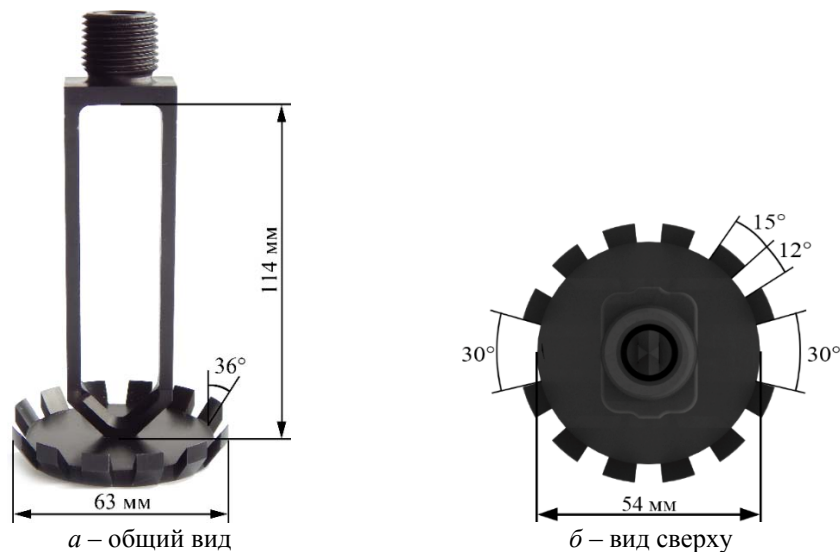


Рисунок 2. – Внешний вид оросителя V2 с оптимальной по кратности пены геометрией

Следующим этапом исследований явилось испытание оросителя V2 в модельных условиях, приближенных к реальному пожару, и определение эффективности тушения пожара пеной, генерируемой при его использовании. Для этого разработаны методики натурных испытаний и оценки эффективности тушения пеной, генерируемой пенными и водопенными оросителями. Данные методики создавались с целью упрощения и удешевления процесса натурных испытаний и оценки эффективности тушения пеной по сравнению с ме-

тодами и способами, описанными в ряде зарубежных ТНПА, касающихся такого рода испытаний^{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}. Важно отметить, что в Республике Беларусь отсутствуют ТНПА, регламентирующие проведение натуральных испытаний пенных и водопенных оросителей для АУП. С целью сравнения эффективности тушения пеной, генерируемой оросителем V2, проведены испытания с еще тремя серийно выпускаемыми для применения в пенных АУП розеточными оросителями.

Методики проведения натуральных испытаний и оценки эффективности тушения пеной, генерируемой оросителями. Основная идея разработанных методик состоит в том, что все параметры испытаний (величина модельного очага пожара, расположение в пространстве и количество одновременно испытываемых оросителей, применяемое горючее вещество (топливо), давление перед оросителем, вид и тип пенообразователя и т. д.) остаются постоянными, а изменяется только лишь применяемый ороситель. Данный подход позволяет исключить влияние факторов, не являющихся целью исследований, и позволяет сосредоточиться только на эксплуатационных характеристиках самого оросителя.

Для определения эффективности тушения пеной, генерируемой оросителем, применялась установка, схема которой представлена на рисунке 3 (размеры указаны в мм). На схеме защищаемая оросителем площадь 9 изображена в форме круга площадью 12 м² (согласно технической документации от производителей пенных и водопенных оросителей, а также ТНПА Республики Беларусь¹¹ данная площадь должна составлять не менее 12 м² при высоте установки оросителя 2,50 ± 0,05 м над защищаемой поверхностью). Как правило, пенные и водопенные оросители розеточного типа, устанавливаемые розеткой вниз, имеют симметричную форму розетки. По этой причине их факел разбрызгивания также симметричен. В рамках данных натуральных испытаний решено ограничиться исследованием только половины факела разбрызгивания площадью 6 м² (на рисунке 3б закрашенная область зеленого круга), т. е. процессы в другой половине идентичны в силу его симметрии.

Для проведения испытаний применялись средства измерений согласно таблице 1. Возможно применение других средств измерений с характеристиками не хуже, чем у приведенных, и при условии их обязательной поверки в установленном порядке.

² См. сноску 1.

³ National Fire Codes, NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=11>. – Date of access: 11.06.2020.

⁴ European Standard. Fire extinguishing media. Foam concentrates. Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids: BS EN 1568-3:2018. – 18.04.2018. – Comite Europeen de Normalisation, 2018. – 62 p.

⁵ European Standard. Fire extinguishing media. Foam concentrates. Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-miscible liquids: BS EN 1568-4:2018. – 09.03.2018. – Comite Europeen de Normalisation, 2018. – 58 p.

⁶ Guidelines for the performance and testing criteria, and surveys of low expansion foam concentrates for fixed fire extinguishing systems: MSC/Circ.582/Corr.1. – 10.07.2000. – International Maritime Organization. – 14 p.

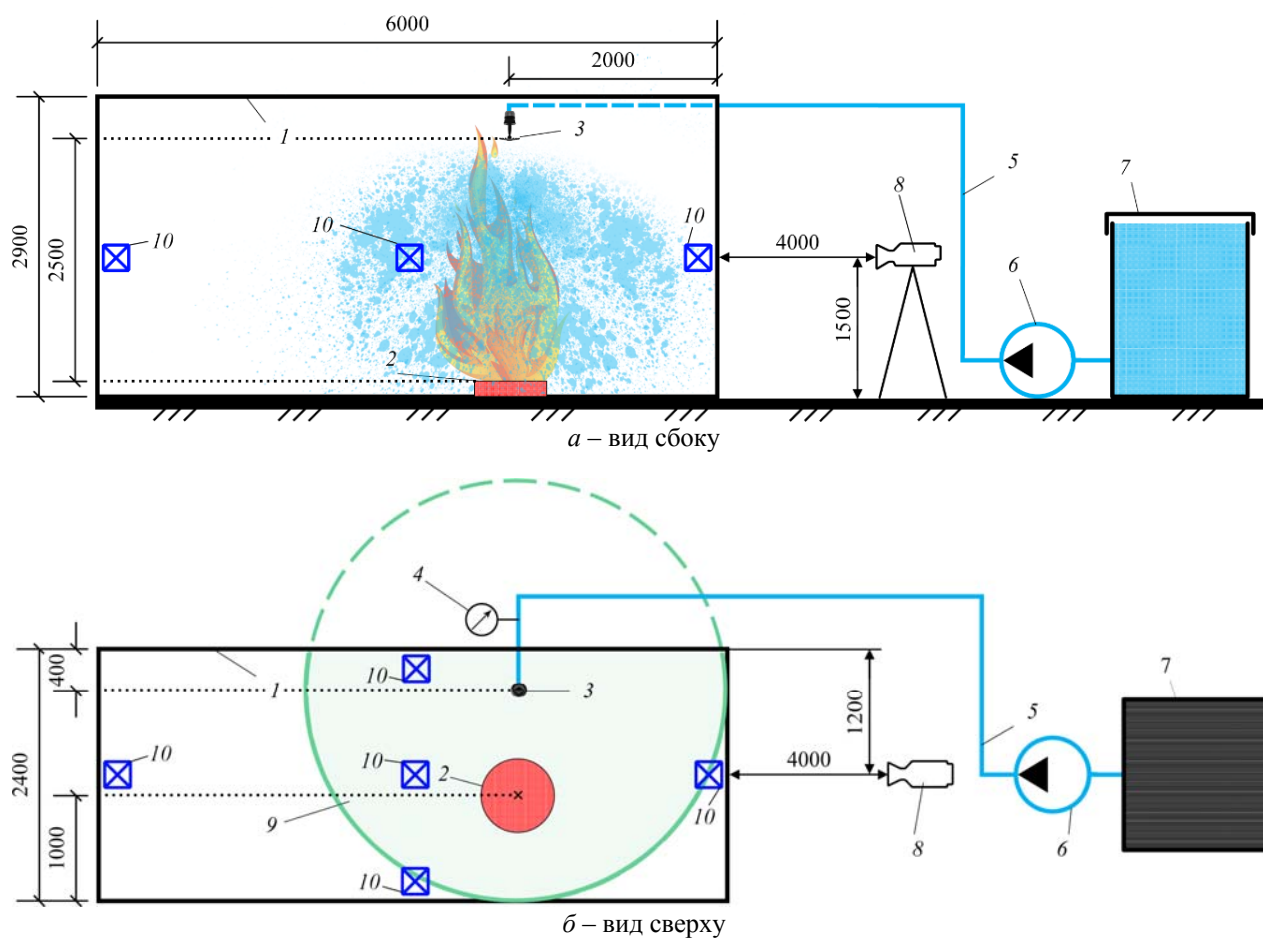
⁷ Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 1: Specification for low-expansion foam concentrates for top application to water-immiscible liquids: ISO 7203-1:2019. – 05.07.2019. – International Organization for Standardization. – 42 p.

⁸ Standard for Foam Equipment and Liquid Concentrates: UL 162. – 23.02.2018. – Underwriters Laboratories Inc. – 50 p.

⁹ Military Specification (US). Fire extinguishing agent, aqueous film forming foam, (AFFF) liquid concentrate, for fresh and sea water: MIL F 24385:F. – 05.08.1994. – US Military Specs/Standards/Handbooks. – 25 p.

¹⁰ Национальный стандарт российской федерации. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 1. Пенообразователи для тушения пожаров водорастворимых горючих жидкостей подачей сверху. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ Р 53280.1-2010. – Введ. 01.07.10. – М.: Стандартиформ, 2010. – 8 с.

¹¹ Государственный стандарт Республики Беларусь. 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: Госстандарт, 2011. – 38 с.



1 – испытательное помещение; 2 – модельный очаг пожара; 3 – ороситель; 4 – манометр; 5 – трубопровод; 6 – насос; 7 – емкость с раствором пенообразователя; 8 – видеокамера; 9 – защищаемая оросителем площадь, 10 – место измерения параметров окружающей среды

Рисунок 3. – Схема установки для натуральных испытаний

Для проведения испытаний применялись средства измерений, представленные в таблице 1. Испытания проводились в испытательном помещении 1 с открытыми со стороны видеокамеры 8 дверями. Температура и влажность в нем перед началом испытаний определялись с помощью термогигрометра, а скорость движения воздушного потока – с помощью анемометра. Атмосферное давление определялось в режиме реального времени по показаниям местных метеорологических станций в радиусе 10 км.

Таблица 1. – Средства измерений

Наименование	Диапазон измерений	Цена деления	Погрешность
Термогигрометр Testo 605-H1	0–50 °С; 5–95 %	0,1 °С; 0,1 %	± 0,6 °С; ± 3,0 %
Анемометр Testo 405-V1	0–10 м/с	0,1 м/с	± (0,31 + 5 % от изм. знач.) м/с
Лазерный дальномер Leica DISTO™ D510	0,05–200 м; 0–360°	1 мм; 0,05°	± 1 мм; ± 0,2°
Мерная емкость	0–2 л	0,005 л	± 0,003 л
Секундомер Electronika RI-01	0 ч 00 мин 00 с – 9 ч 59 мин 59,99 с	0,01 с	± (9,6 · 10 ⁻⁶ · T _{изм. знач.} + 0,01) с
Манометр МП-160	0–1,0 МПа	0,005 МПа	± 0,006 МПа

Испытуемый ороситель 3 крепился розеткой вниз на прямолинейном участке трубопровода 5 на высоте $2,45 \pm 0,01$ м (измерялось при помощи лазерного дальномера). Данная высота измерялась от верхнего среза борта противня, примененного в качестве модельного очага пожара 2, до розетки оросителя 3. Сам ороситель монтировался таким образом, чтобы

плоскость его дужек была перпендикулярна боковым стенам испытательного помещения длиной $6,0 \pm 0,1$ м.

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

Здесь важно пояснить, что АУП проектируются и рассчитываются таким образом, чтобы самый удаленный от насосной станции ороситель обеспечивал как минимум нормативную интенсивность орошения защищаемой им площади [5]. Для абсолютного большинства представленных на рынке оросителей розеточного типа при высоте установки $2,50 \pm 0,05$ м над защищаемой поверхностью нормативная интенсивность орошения пеной согласно паспортным данным обеспечивается именно при минимальном рабочем давлении $0,15 \pm 0,01$ МПа. Следует также подчеркнуть, что при минимальном давлении расходуется наименьшее количество ОТВ. По этой причине определение времени тушения при минимальном рабочем давлении и минимальном расходе ОТВ является наиболее информативным и правильным с практической точки зрения.

Для генерирования пены использовался рабочий раствор синтетического пенообразователя общего назначения ПО-6РЗ (6 %). Приготовление раствора осуществлялось с помощью мерной емкости в цистерне 7 путем смешивания пенообразователя и воды в необходимом соотношении. Для видеофиксации процесса проведения испытаний видеочамера 8 (Panasonic HC-X1000, разрешение видеосъемки 1920x1080 пикселей) устанавливалась на расстоянии $4,00 \pm 0,01$ м от испытательного помещения 1 и $1,50 \pm 0,01$ м от земли.

Проведение испытаний начиналось с подготовки модельного очага пожара 2, который представлял собой круглый противень, изготовленный из стали марки Ст. 3 с номинальным диаметром 700 ± 1 мм, высотой борта 145 ± 1 мм и толщиной стенок $2,0 \pm 0,2$ мм. В данный противень с помощью мерной емкости заливалось $4,0 \pm 0,1$ л воды и сверху $9,0 \pm 0,1$ л топлива. В качестве топлива применялась смесь углеводородов с температурой кипения в пределах $80\text{--}120$ °С (гептан и изомеры – 71,0 %, метилциклогексан – 14,0 %, циклогексан – 8,0 %, другие – 7,0 %). Модельный очаг пожара устанавливается таким образом, чтобы центр противня находился на расстоянии 1000 ± 10 мм от проекции осевой линии оросителя на пол испытательного помещения 1. Не позднее 300 ± 15 с после наполнения противня топливом в нем поджигалось. Затем выдерживалось время свободного горения топлива $t_{\text{св.г.}} = 100 \pm 1$ с, которое для данных условий натуральных испытаний было установлено в рамках предварительных экспериментов, при этом критерием выбора $t_{\text{св.г.}}$ являлось наступление устойчивой температуры по показаниям установленных над модельным очагом пожара термоэлектрических преобразователей [6].

Далее запускался насос 6 (Godiva WT3010, номинальная производительность 4000 л/мин, номинальное давление 10 бар) и по трубопроводу 5 рабочий раствор пенообразователя подавался через ороситель 3 на тушение модельного очага пожара 2. В процессе тушения при помощи секундомера фиксировалось время от начала подачи раствора до полного прекращения горения. Продолжительность тушения ограничивалась временем $t_{\text{max}} = 240 \pm 1$ с, которое также определено заранее при предварительных экспериментах и соответствует моменту начала падения температуры по показаниям установленных над модельным очагом пожара термоэлектрических преобразователей в результате самопроизвольного затухания модельного очага пожара. Если тушение модельного очага пожара не наступало за данный промежуток времени, то испытание прекращалось.

Далее путем наблюдения определялось время повторного воспламенения модельного очага пожара в течение 10 мин, результат фиксировался. Оставшееся после испытания топливо вместе с водой сливалось в отдельную емкость, а борта противня очищались от образовавшегося нагара. Несгоревшее топливо при дальнейшем проведении испытаний не применялось.

По такому же алгоритму проводилось не менее трех испытаний для каждого оросителя. За результат испытаний принималось среднее арифметическое результатов успешных определений времени тушения. Расхождение между результатами испытаний с доверительной вероятностью 0,95 допускалось не более 20 % от среднего значения.

После проведения натуральных испытаний оросителей рассчитывался расход раствора пенообразователя Q (л/мин) через каждый из них по следующей формуле:

$$Q = AK_p \sqrt{P}, \quad (5)$$

где A – переводной коэффициент, $\text{с} \cdot \text{мин}^{-1}$; K_p – коэффициент производительности оросителя (указывается в технической документации к оросителю), $\text{л} / (\text{с} \cdot \text{МПа}^{1/2})$; P – рабочее давление оросителя, МПа.

Затем определялась удельная интенсивность подачи раствора пенообразователя через ороситель $I_{\text{по}}$ ($\text{л} / (\text{мин} \cdot \text{м}^2)$) с помощью выражения:

$$I_{\text{по}} = \frac{Q \cdot j_p}{S_3}, \quad (6)$$

где j_p – коэффициент, показывающий долю разбрызгиваемого оросителем ОТВ, попадающую в пределы защищаемой им площади, равной $S_3 = 12 \text{ м}^2$.

Следует отметить, что розеточные оросители разных производителей имеют отличное друг от друга соотношение количества ОТВ, попадающего внутрь защищаемой площади 12 м^2 и разбрызгиваемого за ее пределы. Чтобы учесть данный факт, введен безразмерный коэффициент j_p , который определяется по паспортным данным на каждую конкретную модель оросителя (для отобранных оросителей данный коэффициент равен: ТУ 3251 – 0,50; ороситель V2 – 0,66; ДПУ-15 – 0,67 и ДВН-11 – 0,63).

Далее для количественной оценки огнетушащей эффективности пены, генерируемой пенными и водопенными оросителями, рассчитывался показатель эффективности тушения E_t . Он объединяет два главных параметра тушения – удельный расход раствора пенообразователя $V_{\text{по}}$ ($\text{л}/\text{м}^2$) и время тушения $t_{\text{туш}}$ (мин). Показатель E_t позволяет оценить, какую площадь можно потушить 1 л раствора пенообразователя за единицу времени. Чем выше абсолютное значение показателя E_t , тем выше огнетушащий эффект. Показатель E_t ($\text{м}^2 / (\text{л} \cdot \text{мин})$) рассчитывается по следующей формуле:

$$E_t = (V_{\text{по}} \cdot t_{\text{туш}})^{-1}. \quad (7)$$

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

$$E_t = (I_{\text{по}} \cdot t_{\text{туш}}^2)^{-1}. \quad (8)$$

Результаты натуральных испытаний. В таблице 2 представлены оросители, которые испытывались по описанной выше методике, а также время тушения модельного очага пожара и повторного воспламенения для каждого из них. Поскольку оросители имеют различный удельный расход ОТВ (из-за различного коэффициента производительности K_p), для их сравнения рассчитан показатель эффективности тушения E_t , который также представлен в таблице 2.

Ввиду высокой трудоемкости натурные испытания оросителей проводились в течение двух дней. Очередность оросителей для испытаний была установлена случайным (случайным) способом.

Таблица 2. – Данные об оросителях и результаты натурных испытаний

Модель	ТУ 3251	Ороситель V2	ДПУ-15	ДВН-11
Производитель	ТУСО (США)	Университет гражданской защиты МЧС Беларуси	Спецавтоматика (Россия)	АкваВива (Беларусь)
Внешний вид				
Коэффициент производительности K_p , л / (с · МПа ^{1/2})	4,2	3,7	7,4	4,4
Время тушения $t_{туш}$, с	Нет тушения	63 ± 6	69 ± 5	121 ± 9
Повторное воспламенение	Не определялось	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Показатель E_i , м ² / (л · мин) · 10 ²	Не определялся	19,45 ± 0,03	7,81 ± 0,03	4,59 ± 0,05

В первый день испытывались ТУ 3251 и ороситель V2 при следующих параметрах окружающей среды: температура 1,9–3,1 °С, влажность 75,0–83,0 %, скорость воздушного потока 2,5–3,2 м/с (с порывами до 5,0 м/с), атмосферное давление 722 мм рт. ст. Во второй день испытывались ДПУ-15 и ДВН-11 при температуре 2,5–4,0 °С, влажности 76,0–85,0 %, скорости воздушного потока 0,9–1,5 м/с (с порывами до 3,0 м/с), атмосферном давлении 741 мм рт. ст. Процесс тушения модельного очага пожара оросителями фиксировался с помощью видеокамеры (рис. 4).

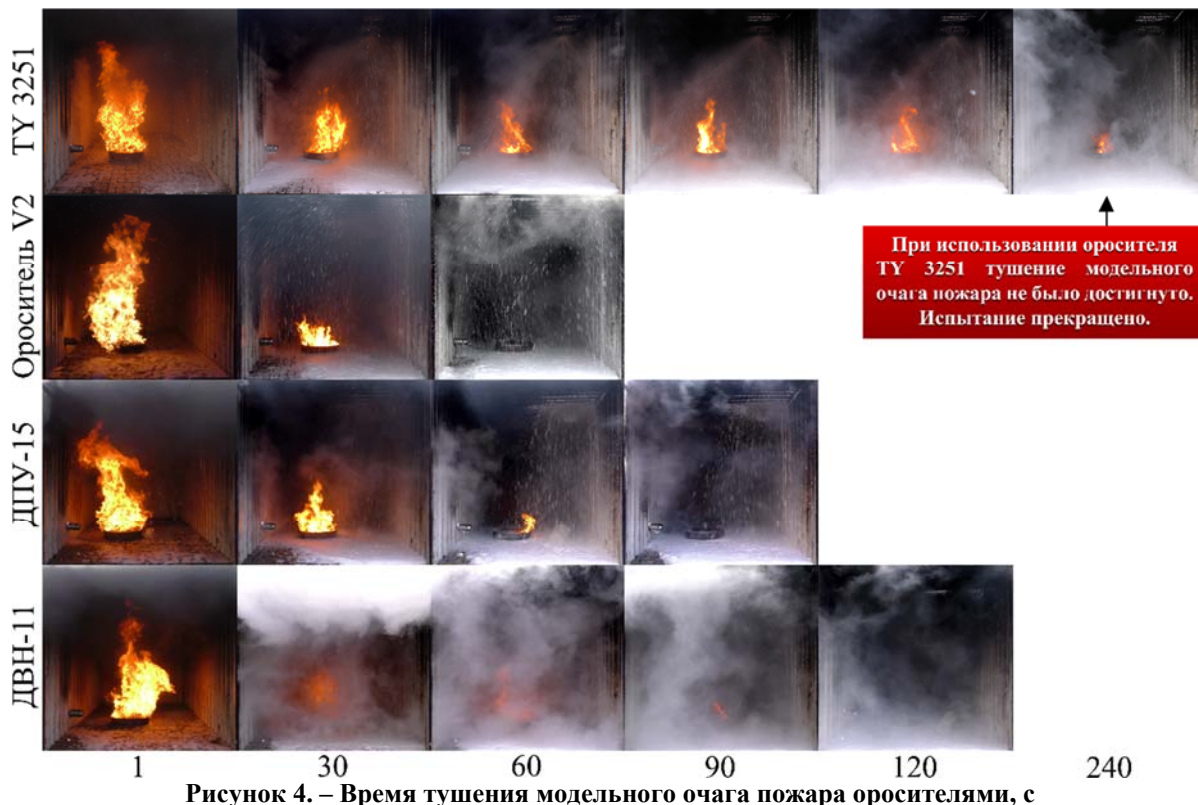


Рисунок 4. – Время тушения модельного очага пожара оросителями, с

Следует заметить, что ввиду малого рабочего давления при проведении испытаний та часть потока, которая направлялась оросителем в стену испытательного помещения, либо отбивалась от нее, либо просто стекала вниз, но ни в том, ни в другом случае не попадала в модельный очаг пожара и не влияла на результат тушения.

Согласно проведенным натурным испытаниям лучший результат (время тушения модельного очага пожара 63 ± 6 с) показал ороситель V2. При использовании оросителя ДПУ-15 тушение было достигнуто за 69 ± 5 с, а оросителя ДВН-11 за 121 ± 9 с, что на 9,5 % и 92,1 % соответственно дольше по сравнению с оросителем V2. Худший результат показан оросителем ТУ 3251 – тушение не было достигнуто за время проведения испытаний (240 ± 1 с). Объясняется это тем, что ТУ 3251 по большей степени разрабатывался для применения с пленкообразующими пенообразователями целевого назначения, для которых высокая кратность генерируемой пены не является определяющим фактором тушения пожара.

Основной огнетушащий эффект пены, генерируемой из таких пенообразователей, заключается в формировании плотной пленки на поверхности горючего вещества, которая перекрывает доступ кислорода к нему. Однако пленкообразующие пенообразователи значительно дороже и наносят больший ущерб окружающей среде по сравнению с пенообразователями общего назначения (например, ПО-6РЗ (6 %), который применялся в проведенных испытаниях) за счет наличия в них перфторалкилов, которые загрязняют почву и грунтовые воды.

Для пенообразователей общего назначения одним из определяющих факторов успешного тушения пожара является кратность генерируемой из него пены: чем она выше, тем быстрее достигается огнетушащий эффект [7; 8]. Еще одним объяснением, почему модельный очаг пожара не был потушен оросителем ТУ 3251, является распределение ОТВ по защищаемой поверхности. Так, по сравнению с остальными оросителями ТУ 3251 имеет наименьший коэффициент $j_p = 0,5$, т. е. только 50 % ОТВ попадает в пределы защищаемой площади 12 м^2 . Таким образом, основываясь на полученных результатах, можно заключить, что средняя интенсивность орошения защищаемой площади оросителем ТУ 3251 и кратность генерируемой им пены недостаточны для тушения модельного очага пожара в условиях, созданных при проведении натурных испытаний.

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

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

Отметим, что производители оросителей ТУ 3251, ДВН-11 и ДПУ-15 в технической документации указывают, что кратность пены при их использовании составляет не менее 5.

В то же время экспериментальные исследования [9; 10] показали, что ороситель ТУ 3251 и ему подобные (например, ДВН-11), которые имеют относительно малую длину дужек ($L = 30 \pm 3$ мм), внешний диаметр ($D = 30 \pm 3$ мм) и коэффициент рабочей поверхности розетки ($K_s = 50\text{--}65$ %), а также угол конусности лопастей розетки $\alpha \geq 90^\circ$, позволяют генерировать пены кратностью 6–8 в зависимости от используемого пенообразователя. Ороситель ДПУ-15 имеет уже близкие к оптимальным значения геометрических параметров розетки оросителя ($D = 50,0 \pm 0,2$ мм, $K_s = 86,0 \pm 0,5$ % и $\alpha = 32 \pm 1^\circ$), тем не менее, при достаточно малой длине его дужек $L = 35$ мм потенциал такой розетки не реализуется, как, например, при оптимальном значении $L = 114 \pm 4$ мм у оросителя V2. Для прогноза кратности пены, генерируемой оросителем ДПУ-15, использована экспериментально-статистическая математическая модель, описывающая взаимосвязь кратности пены с геометрическими параметрами основных элементов оросителя (дужек и розетки) [3].

В результате расчета получено прогнозное значение $K_{\text{теор}} = 8,1 \pm 0,2$. При сопоставлении значений кратности пены и показателя эффективности тушения E_t для каждого из испытанных оросителей (табл. 2) видно, что чем выше значение кратности пены, генерируемой оросителем, тем большей эффективностью тушения она обладает. Данная взаимосвязь вновь подтверждает значимость кратности пены для тушения пожаров ЛВЖ и ГЖ при использовании пенообразователей общего назначения типа S¹².

Заключение

Получена линейная зависимость устойчивости пены от ее кратности для пенообразователя ПО-6РЗ (6 %) – $C = 13,84K$ (при условии, что C определяется как время выделения из ВМП 25 % жидкой фазы).

Разработана методика проведения натуральных испытаний пенных и водопенных оросителей для АУП. Данная методика позволяет с минимальными временными и материальными затратами смоделировать близкую к реальным условиям пожара ситуацию, испытать в этих условиях оросители и получить исходные данные для дальнейшей оценки эффективности тушения пеной, генерируемой ими.

Разработана методика оценки эффективности тушения пеной, генерируемой пенными и водопенными оросителями для АУП. С помощью данной методики можно сравнить огнетушащую эффективность пены, генерируемой оросителями, по специальному показателю эффективности тушения E_t , учитывающему время тушения пожара и расход раствора пенообразователя.

Согласно разработанной методике проведены натурные испытания оросителя V2 и применяемых в пенных АУП оросителей ТУ 3251 (ТУСО, США), ДПУ-15 (Спецавтоматика, Россия), ДВН-11 (АкваВива, Беларусь). По методике оценки эффективности тушения пеной для каждого испытанного оросителя рассчитан показатель эффективности тушения E_t . Согласно полученным результатам пена, генерируемая оросителем V2, обладает в 2,5 раза большей огнетушащей эффективностью по сравнению с пеной оросителя ДПУ-15 и в 4,2 раза по сравнению с ДВН-11. Оросителем ТУ 3251 в рамках созданных условий при натуральных испытаниях модельный очаг пожара потушить не удалось. На основании полученных результатов показано, что эффективность тушения пеной, генерируемой оросителем, зависит от ее кратности, при этом чем выше данная качественная характеристика, тем быстрее достигается огнетушащий эффект.

Результаты исследований получены в рамках выполнения научно-исследовательской работы при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т19М-090).

¹² См. сноску 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов, И.В. Установки автоматического пожаротушения с предварительной аэрацией огнетушащей рабочей среды / И.В. Качанов, И.В. Карпенчук, С.Ю. Павлюков; Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2018. – 148 с.
2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 224 с.
3. Kamluk, A.N. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov // *Fire Safety Journal*. – 2019. – Vol. 109. – P. 102862-1–102862-8. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102862.
4. Лихоманов, А.О. Комплексные испытания оросителя, оптимизированного по кратности пены / А.О. Лихоманов // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 247–254. DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.247.
5. Мешман, Л.М. Влияние проектного значения интенсивности орошения диктующего оросителя на гидравлические параметры распределительной сети АУП / Л.М. Мешман // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2019. – Т. 28, № 2. – С. 93–97.
6. Лихоманов, А.О. Время свободного горения топлива в модельном очаге для натуральных испытаний пенного оросителя / А.О. Лихоманов, А.Н. Камлюк // *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 апр. 2020 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Беларуси*. – Минск, 2020. – С. 84–86.
7. Корольченко, Д.А. Огнетушащая эффективность пены низкой кратности / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников, Е.Н. Дегаев // *Научное обозрение*. – 2015. – № 8. – С. 114–120.
8. Хиль, Е.И. Экспериментальное определение минимального удельного расхода и оптимальной интенсивности подачи пенообразователя при тушении пламени нефтепродуктов / Е.И. Хиль, С.С. Воевода, А.Ф. Шароварников, И.П. Макарова // *Пожарная безопасность*. – 2015. – № 4. – С. 76–81.
9. Лихоманов, А.О. Обоснование применения розеточных оросителей, изготавливаемых при помощи аддитивных технологий, в экспериментальных исследованиях качественных характеристик воздушно-механической пены низкой кратности / А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор, А.Н. Камлюк // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 25–39. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.25.
10. Камлюк, А.Н. Экспериментальные исследования влияния конструктивных элементов оросителей на кратность воздушно-механической пены / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 167–177. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.167.

Экспериментальное определение эффективности тушения пожара класса В пеной низкой кратности, генерируемой розеточными оросителями
Experimental determination of the Class B fire extinguishing efficiency using low-expansion foam generated by deflector type sprinklers

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: ul. Mashinostroiteley, 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

Лихоманов Алексей Олегович

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

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», Faculty of Postgraduate Scientific Education, Adjunct

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

e-mail: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

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: ul. Mashinostroiteley, 25, 220118, Minsk, Belarus

e-mail: Grachulin@ucp.by

ORCID: 0000-0003-3832-8258

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.251>

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CLASS B FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY USING LOW-EXPANSION FOAM GENERATED BY DEFLECTOR TYPE SPRINKLERS

Likhomanov A.O., Kamlyuk A.N., Grachulin A.V.

Purpose. To establish the relationship between the foam expansion rate and stability of low-expansion air-mechanical foam generated in deflector type sprinklers for automatic extinguishing systems. To develop a methodology and carry out field tests of foam and foam-water sprinklers. To compare the extinguishing efficiency of the tested sprinklers basing on the results of field tests.

Methods. The method of regression analysis was used to establish the dependence of the foam stability on its expansion rate. The assessment of the extinguishing efficiency of the sprinklers was carried out experimentally, and the processing of the obtained experimental data was carried out using the method of estimation and expression of measurement uncertainty.

Findings. A linear relationship has been established between the expansion rate K and stability C of the low-expansion air-mechanical foam: $C = \gamma \cdot K$, where γ is an empirical coefficient depending on the physicochemical properties of the foaming agent. The empirical dependences $C = f(K)$ were obtained for brand of the foaming agents PO-6RZ (6 %). The methodology was developed and field tests of four deflector type sprinklers (V2 sprinkler with optimized geometry on the foam expansion rate, TY 3251 (USA), DPU-15 (Russia) and DVN-11 (Belarus)) were carried out. To compare the extinguishing efficiency of the sprinklers, the extinguishing efficiency indicator E_t was used. This indicator takes into account the extinguishing time of the model fire site and the discharge rate of the extinguishing agent. In the result of field tests, it was found that the V2 sprinkler has at least 2.5 times better extinguishing efficiency compared to other tested sprinklers.

Application field of research. The obtained empirical dependence $C = \gamma \cdot K$ can be used to predict the stability of the foam based on its expansion rate value and vice versa. The developed methods of field testing and evaluating the extinguishing efficiency of foam and foam-water deflector type sprinklers can be implemented for the development of standards, as well as for the study of other sprinklers in conditions close to a real fire.

Keywords: foam expansion rate, foam stability, foam dispersion, extinguishing efficiency, extinguishing time, extinguishing agent discharge, automatic extinguishing system, sprinkler, field tests.

(The date of submitting: June 25, 2020)

REFERENCES

1. Kachanov I.V, Karpenchuk I.V., Pavlyukov S.Yu. *Ustanovki avtomaticheskogo pozharotusheniya s predvaritel'noy aeratsiyey ognetyushashchey rabochey sredy* [Automatic fire extinguishing systems with preliminary aeration of a fire extinguishing medium]: monograph. Belarusian National Technical University. Minsk: BNTU, 2018. 148 p. (rus)
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus)
3. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry. *Fire Safety Journal*, 2019. Vol. 109. Pp. 102862-1–102862-8. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102862.
4. Likhomanov A.O. Comprehensive testing of the sprinkler optimized by the foam expansion rate. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 3. Pp. 247–254. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.247.
5. Meshman L.M. Effect of irrigation intensity design value dictating the sprinkler on the hydraulic parameters of the distribution network AFES. *Fire and Explosion Safety*, 2019. Vol. 28, No. 2. Pp. 93–97. (rus)
6. Likhomanov A.O. Vremya svobodnogo goreniya topliva v model'nom ochage dlya naturnykh ispytaniy pennogo orositelya [The time of free combustion of fuel in the model center for full-scale testing of the foam sprinkler]. *Proc. XIV Intern. scientific-practical conf. «Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy»*, Minsk, April 8–9, 2020. University of Civil Protection. Minsk, 2020. Pp. 84–86. (rus)

7. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F., Degaev E.N. Ognetchashchaya effektivnost' peny nizkoy kratnosti [Fire extinguishing efficiency of foam of low expansion rate]. *Nauchnoe obozrenie*, 2015. No. 8. Pp. 114–120. (rus)
8. Khil' E.I., Voevoda S.S., Sharovarnikov A.F., Makarova I.P. Experimental determination of minimum discharge intensity and optimum rate of foaming agent input during suppression of oil products flame. *Fire Safety*, 2015. No. 4. Pp. 76–81. (rus)
9. Likhomanov A.O., Govor E.G., Kamlyuk A.N. The substantiation of the application of deflector sprinklers manufactured by additive technologies in experimental studies of qualitative characteristics of the low-expansion air-mechanical foam. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 1. Pp. 25–39. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.25.
10. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O. Experimental investigations of the influence of the structural elements of sprinklers on the expansion rate of air-mechanical foam. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 2. Pp. 167–177. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.167.