

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

Камлюк А.Н.

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

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

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

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

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

(Поступила в редакцию 2 октября 2025 г.)

Введение

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

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

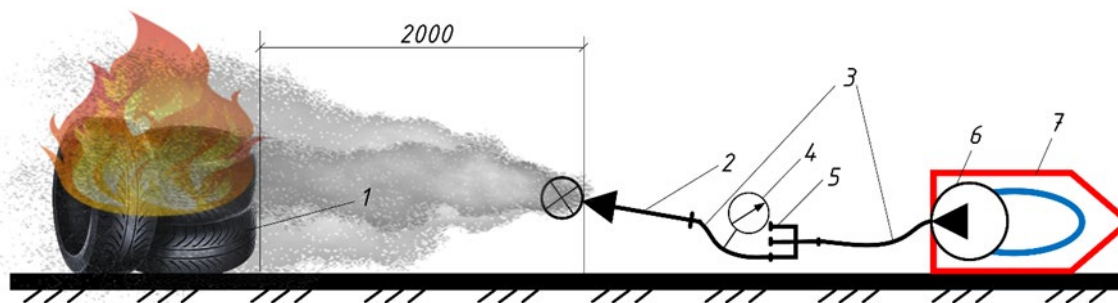
Для получения пены низкой кратности (далее – пена) применяются следующие устройства для ее формирования: генераторы пены [3–8], установки генерирования компрессионной пены (УГКП) [9–13], пенные и водопенные розеточные оросители автоматических установок пожаротушения (АУП) [14–16]. Несмотря на то что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

Основная часть

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

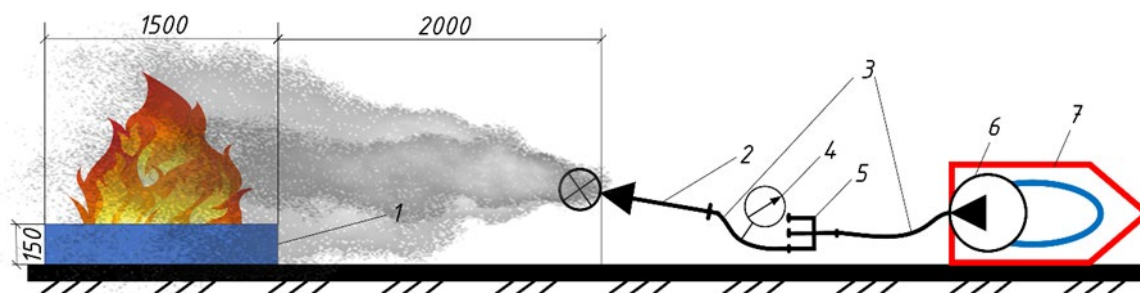
Для определения огнетушащей эффективности устройств для формирования пены необходимо проводить сравнительные исследования эффективности тушения модельного очага пожара классов А или В. Стандартный модельный очаг пожара А – это деревянный штабель, размеры и конструкция которого определены стандартом,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

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



а – тушение модельного очага пожара класса А

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

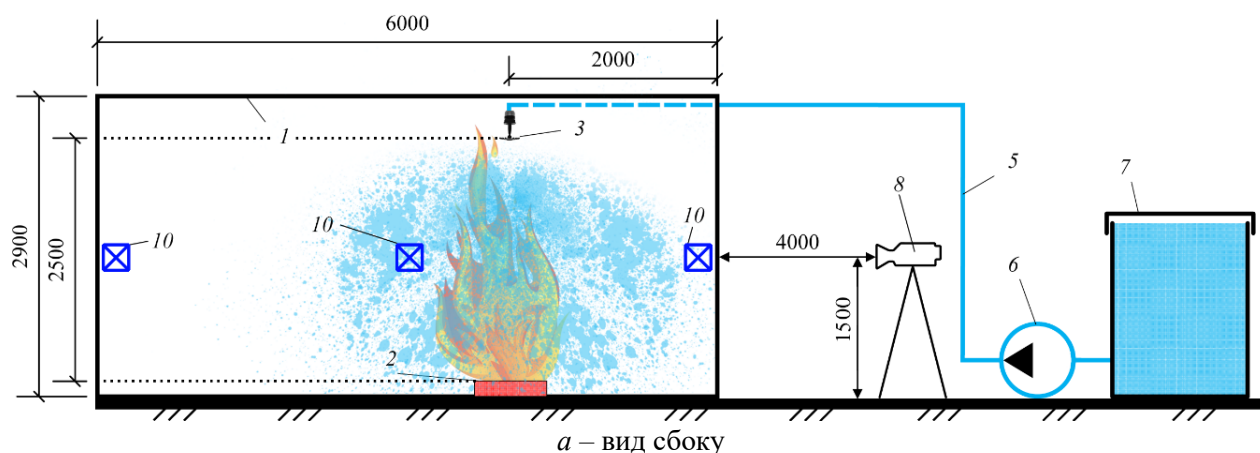


б – тушение модельного очага пожара класса В

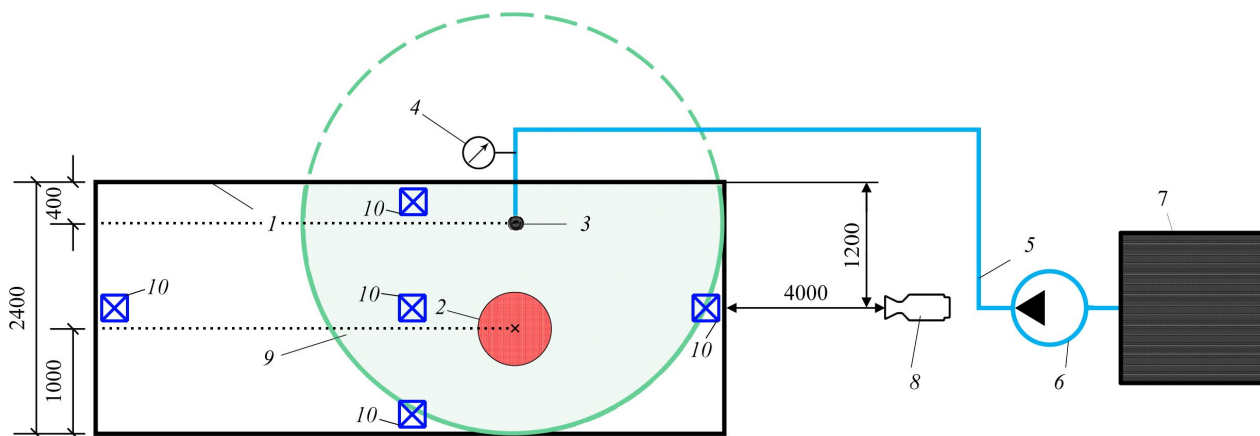
1 – модельный очаг пожара; 2 – генератор пены; 3 – рукавная линия; 4 – манометр;
5 – разветвление трехходовое РТ-80; 6 – пожарный насос; 7 – пожарная автоцистерна

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

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



а – вид сбоку



б – вид сверху

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Таблица 1. – Экспериментальное оборудование

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

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

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

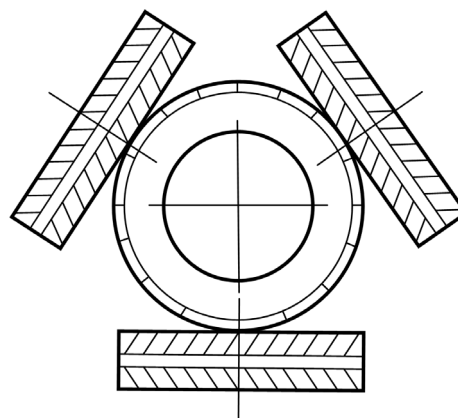


Рисунок 3. – Схема расположения автомобильных покрышек в условном очаге пожара (вид сверху)

Таблица 2. – Средства измерений

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

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

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

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

– для генераторов пены и УГКП с помощью выражения:

$$I_{\text{ПО}} = Q/S_3, \quad (1)$$

– для АУП с помощью выражения:

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

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

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

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

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

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

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

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

P – рабочее давление оросителя, МПа.

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

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

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

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

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










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

$$K_{КТ} = E_t / E_{t0}, \quad (6)$$


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

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

Таблица 3. – Технические характеристики исследуемых устройств и установок

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

Продолжение таблицы 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

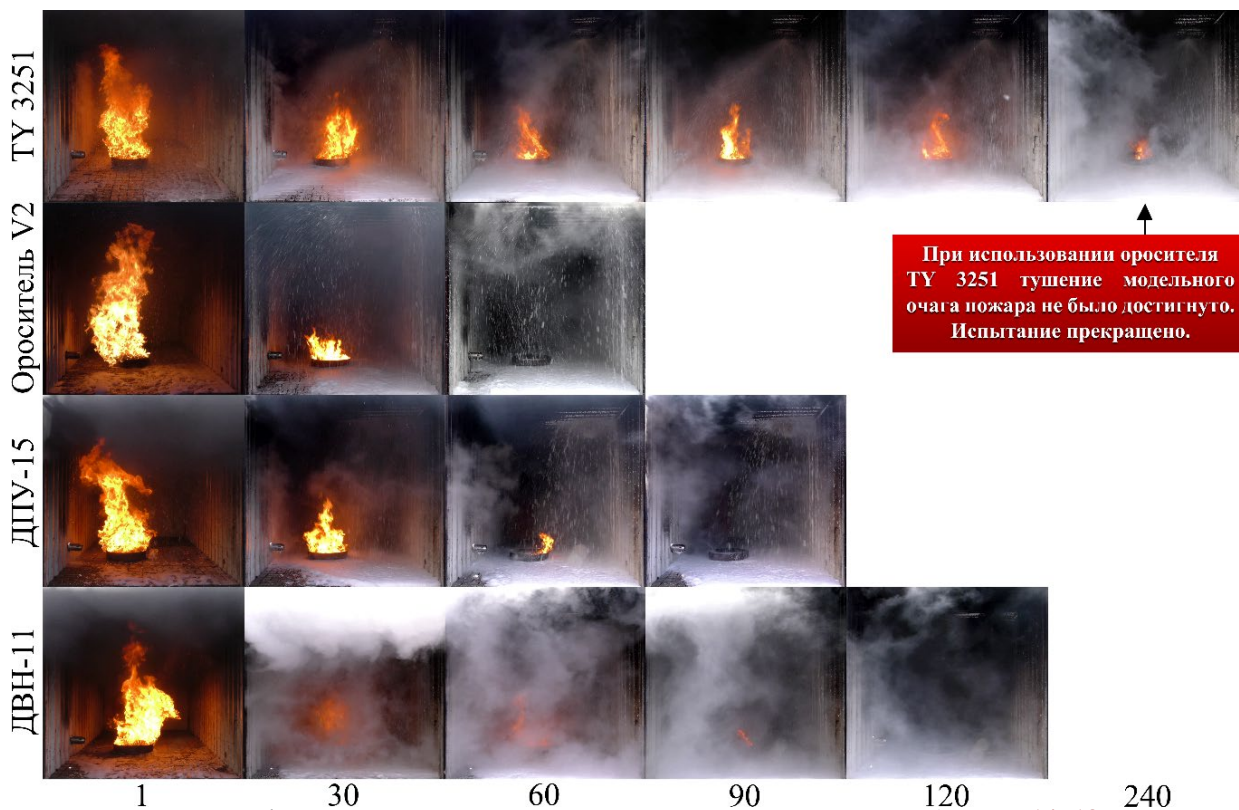


Рисунок 4. – Время тушения очага пожара класса В с помощью АУП, с [14; 18]

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

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

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

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

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

В таблице 5 представлены результаты натурных испытаний генераторов пены.

Таблица 5. – Результаты натурных испытаний генераторов пены

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

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



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

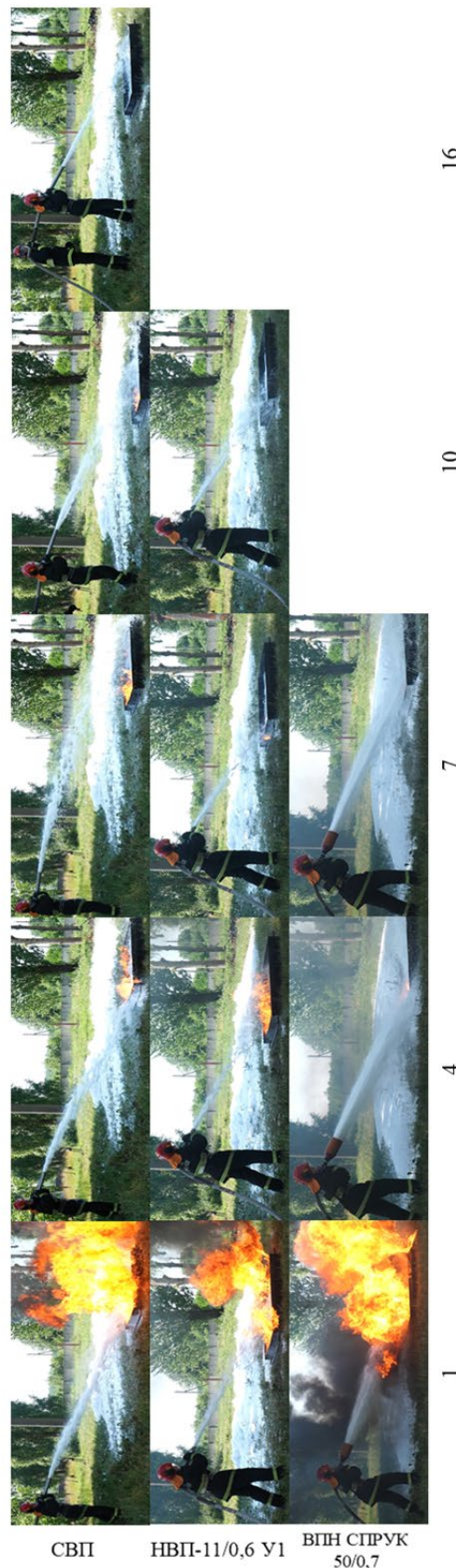


Рисунок 6. – Время тушения модельного очага пожара класса В генераторами пены, с [8]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$A = 1/60$ – переводной коэффициент, $\text{с} \cdot \text{мин}^{-1}$;

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

$t_{\text{туш}}$ – время тушения, с.

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

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

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

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

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

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

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

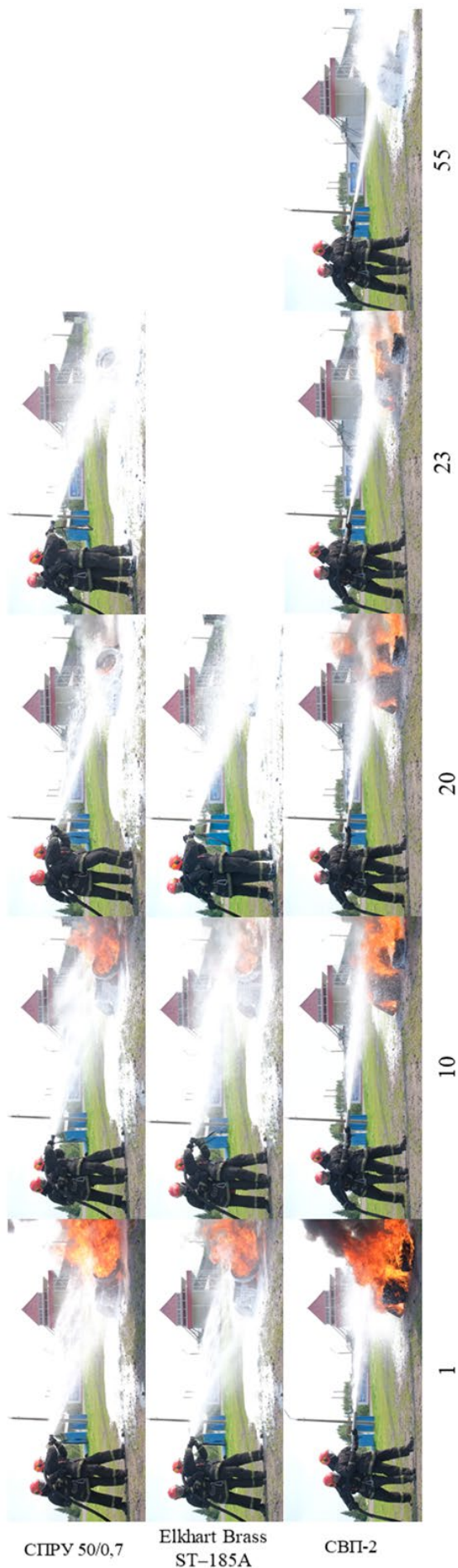


Рисунок 7. – Время тушения модельного очага пожара класса А с помощью УГКП, с

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

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

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

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

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

Заключение

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

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

ЛИТЕРАТУРА

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

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

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

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

Камлюк Андрей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

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

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

Email: kan@ucp.by

SPIN-код: 8858-0296

Andrey N. Kamlyuk

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

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

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

ScopusID: 57218325403

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

Kamlyuk A.N.

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

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

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

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

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

(The date of submitting: October 2, 2025)

REFERENCES

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

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

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

Copyright © 2026 Kamlyuk A.N.

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