

УДК 614.844.5

Grachulin_A@mail.ru

**МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ
ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ****METHODS OF APPLICATION OF COMPRESSION FOAM
FOR EXTINGUISHING FIRES**

*Камлюк А.Н., кандидат физико-математических наук, доцент,
Грачулин А.В., кандидат технических наук
Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск
Kamluk A.N., Grachulin A.V.,
University of Civil Protection of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk*

На вооружении пожарных подразделений МЧС Республики Беларусь имеется ряд импортных пеногенерирующих систем со сжатым воздухом, которые из-за отсутствия обоснованных тактико-технических характеристик и методов их применения для тушения пожаров используются по аналогии с традиционной технологией тушения пожаров воздушно-механической пеной низкой кратности с применением воздушно-пенных пожарных стволов. Помимо того, очевидно, что существующая методика гидравлического расчета рукавных линий неприемима в случае движения компрессионной пены.

Преимущества пеногенерирующих систем со сжатым воздухом перед традиционными технологиями пенного пожаротушения делают задачи по определению тактико-технических характеристик этих систем и разработке методов их применения для тушения пожаров весьма актуальными. В свою очередь высокая стоимость импортных пеногенерирующих систем со сжатым воздухом в условиях реализации политики импортозамещения определяет необходимость разработки отечественной системы и рекомендаций по ее эффективному использованию пожарными подразделениями.

Ключевые слова: пеногенерирующая система со сжатым воздухом, компрессионная пена, газожидкостный поток, квазигомогенная модель, инженерная методика, технология тушения пожаров.

In the arsenal of fire departments of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus there are a number of imported compressed air foam systems, which are used by analogy with the traditional technology of extinguishing fires with air-mechanical foam of low multiplicity with the use of foam nozzles due to the lack of well-grounded tactical and technical characteristics and methods of their application for extinguishing fires. In addition, the existing method of hydraulic calculation of hose lines is not applicable in the case of compression foam movement.

Advantages of compressed air foam systems before of traditional foam fire extinguishing technologies make the tasks of determining the tactical and technical characteristics of these systems and developing methods for their application to extinguish fires very relevant. In turn, the high cost of compressed air foam systems in the context of

implementing the import substitution policy determines the need to develop a domestic system and recommendations for its effective use by fire departments.

Keywords: compressed air foam system, compression foam, gas-liquid flow, quasi-homogeneous model, engineering technique, technology of fire extinguishing.

Вода – основное огнетушащее вещество, используемое при ликвидации пожаров. Наряду с такими преимуществами ее применения в целях пожаротушения, как низкая стоимость и экологическая безвредность, существует и ряд недостатков. Из-за высокого поверхностного натяжения вода обладает низкой смачивающей способностью, вследствие чего быстро стекает с горящих объектов, и значительная ее часть не участвует в процессе тушения.

Одним из способов повышения огнетушащей эффективности воды является использование пенообразователей (ПО) на основе поверхностно-активных веществ. В результате механического перемешивания раствора воды и ПО с воздухом получают воздушно-механические пены, которые представляют собой дисперсные системы, состоящие из пузырьков воздуха, окруженных пленками жидкости. Различают

воздушно-механические пены низкой кратности (до 20), средней кратности (20–200) и высокой кратности (более 200), причем под кратностью понимается отношение объема пены к объему раствора воды и ПО, содержащегося в ней.

Одним из современных способов получения пены низкой кратности является введение в поток раствора воды и ПО сжатого воздуха. Это приводит к тому, что вода, воздух и ПО смешиваются непосредственно в рукавной линии, и по ней к очагу пожара подается не жидкий раствор воды и ПО, как в традиционных способах подачи воздушно-механической пены, а компрессионная пена (газожидкостная смесь). Для реализации описанного способа применяются пеногенерирующие системы со сжатым воздухом (ПССВ), принципиальная схема которых приведена на рисунке 1.

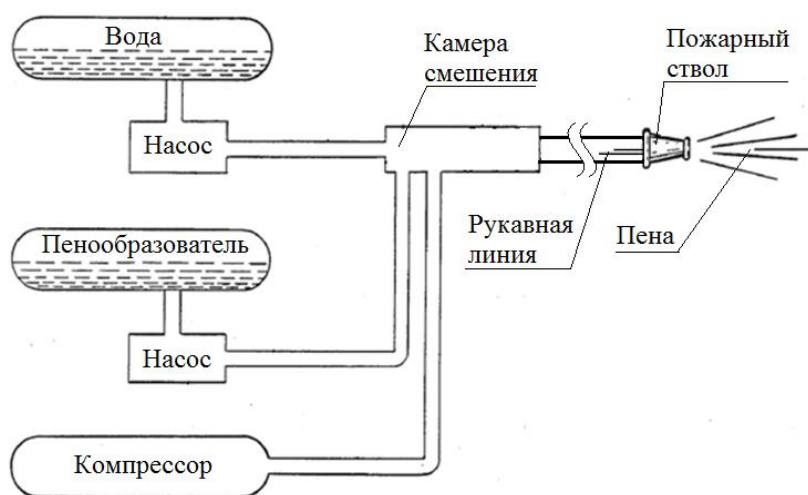


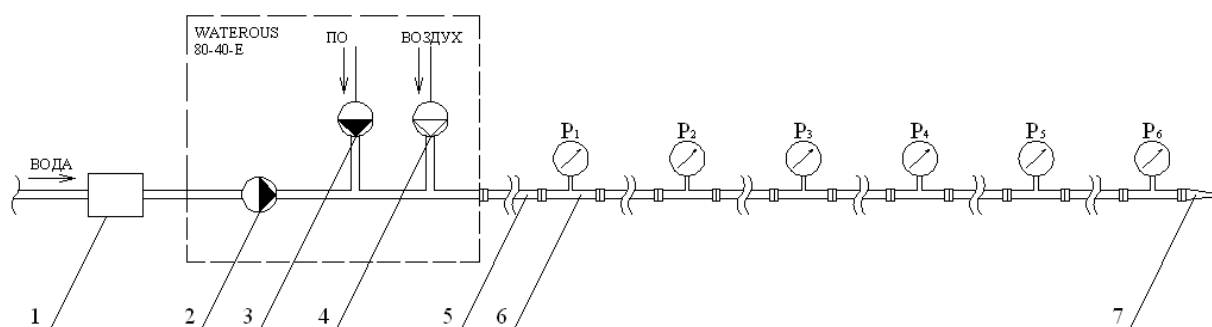
Рисунок 1. Принципиальная схема ПССВ

Анализ традиционных технологий пенного пожаротушения с использованием ствольной техники, автоматических установок пожаротушения и систем подслоного тушения, а также альтернативных – систем подачи компрессионной пены, показал, что применение ПССВ имеет

существенные преимущества над традиционными технологиями пенного пожаротушения: экономичность, многофункциональность, высокая эффективность [1–3]. Однако из-за высокой стоимости, отсутствия обоснованных тактико-технических характеристик ПССВ и ме-

тодов применения систем для тушения пожаров имеющиеся на вооружении пожарных подразделений МЧС Республики Беларусь импортные ПССВ не получили широкого распространения и используются по аналогии с традиционной технологией тушения пожаров с применением воздушно-пенных пожарных стволов, что не позволяет в полной мере раскрыть преимущества ПССВ и использовать их максимально эффективно. Помимо того, установлено, что для расчета рукавных линий ПССВ не может быть использована классическая методика гидравлического расчета, так как в рукавной линии ПССВ движется не вода, а компрессионная пена (газожидкостная смесь). Параметры газожидкостного потока зависят, главным образом, от его структуры, которая определяется визуально и (или) с использованием карт режимов (диаграмм структур) газожидкостных потоков.

Все вышесказанное в совокупности определяет необходимость проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в рукавной линии. С этой целью разработана экспериментальная установка [4, 5], схема которой представлена на рисунке 2. Для подачи в рукавную линию компрессионной пены использовалась портативная ПССВ Waterous 80-40-E, которая оборудована системой дозирования ПО Aquis™ 1.5. Рукавная линия состояла из 6 прорезиненных пожарных напорных рукавов с внутренним диаметром 51 мм. К выпускному патрубку ПССВ был присоединен пожарный рукав, который служил для окончательного перемешивания компонентов компрессионной пены и обеспечивал расположение остальных пяти рукавов (общая длина около 100 м) на горизонтальной поверхности.



1 – расходомер; 2 – водяной насос; 3 – насос ПО; 4 – компрессор; 5 – рукавная линия;
6 – рукавная вставка с датчиком давления; 7 – ручной пожарный ствол

Рисунок 2. Схема экспериментальной установки

В рукавную линию для фиксации характера изменения давления были установлены последовательно между рукавами 6 рукавных вставок с датчиками давления, каждый из которых состоит из пьезоэлектрического преобразователя давления и технологического измерителя (рисунок 2). Такое количество рукавных вставок связано с предположением, что падение давления по длине рукавной линии не будет линейным, как при движении воды, в меру изменения плотности и скорости потока. Стоит отметить, что

значение длины рукавной линии соответствует применяемым в практике пожаротушения рабочим и магистральным линиям. На конце рукавной линии в различных сериях измерений использовались ручные пожарные стволы Elkhart Brass ST-185A и PC-70.

Для проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в рукавной линии была разработана методика, сущность которой заключается в определении потерь давления по длине участка рукавной линии пу-

тем установления разницы показаний измерительных приборов давления, расположенных на концах рассматриваемого участка рукавной линии. Делением полученного значения потерь давления на длину соответствующего участка рукавной линии определялись удельные потери давления.

Методикой проведения экспериментальных исследований в каждой серии предусматривались прямые измерения объемного расхода воды и избыточного давления в рукавной линии, косвенные измерения потерь давления по длине измеряемого участка рукавной линии и удельных потерь давления. Помимо того, исходя из положения регулятора системы дозирования ПО, определялся объемный расход ПО. Неизменными принимались диаметр рукавной линии, расстояние между датчиками давления, расход компрессора.

Эксперименты проводились при различных расходах раствора воды и ПО (в диапазоне 1 – 4 л/с), диаметрах насадка пожарного ствола (13, 19, 24 мм) и с использованием различных видов ПО (углеводородные ОПС-0.4 и Синтек, фторсодержащий Барьер-пленкообразующий), причем в рамках отдельно взятой серии эксперимента изменяли только один параметр из вышеперечисленных.

Во время проведения экспериментальных исследований визуально обнаружено, что поток компрессионной пены при достижении некоторого минимального значения концентрации ПО в воде при постоянных расходных и геометрических параметрах приобретал пробковую структуру. В следствие этого из ручного пожарного ствола вместо компрессионной пены попеременно осуществлялась подача отдельно раствора воды и ПО и отдельно воздуха. Как следствие, прекращалась подача компрессионной пены от ПССВ, что в условиях тушения пожара недопустимо. В связи с этим были определены минимально допустимые концен-

трации содержания ПО в растворе воды и ПО для получения компрессионной пены: ОПС-0.4 – 0,4 %, Синтек и Барьер-пленкообразующий – 2 %.

В результате экспериментальных исследований движения компрессионной пены по рукавной линии при одинаковых значениях расходных и геометрических параметров с использованием различных марок ПО в минимально допустимых концентрациях получено, что значения избыточного давления по длине рукавной линии отличаются не более чем на 10 %. Это позволяет утверждать об отсутствии влияния вида ПО на потери давления при движении компрессионной пены в рукавной линии ПССВ, в связи с чем при проведении дальнейших экспериментальных исследований в качестве ПО использовался ОПС-0.4.

На рисунке 3 приведены графики изменения избыточного давления по длине рукавной линии для различных расходов раствора воды и ПО и диаметре насадка 24 мм, а на рисунке 4 показаны зависимости удельных потерь давления от объемного расхода раствора воды и ПО для разных диаметров насадка пожарного ствола (13, 19 и 24 мм), а также зависимость, соответствующая потоку воды.

Как видно из рисунка 3, зависимость избыточного давления от длины рукавной линии при расходе раствора воды и ПО более 2 л/с имеет линейный вид, а при расходе менее 2 л/с – нелинейный (квадратичный). Также стоит отметить, что при постоянном диаметре насадка увеличение значения расхода раствора воды и ПО приводит к росту значения избыточного давления в рукавной линии.

Вид зависимости удельных потерь давления от объемного расхода воды и ПО (рисунок 4) существенно отличается от аналогичной зависимости при движении воды, что подтверждает некорректность использования существующей методики гидравлического расчета рукавных линий в случае применения ПССВ.

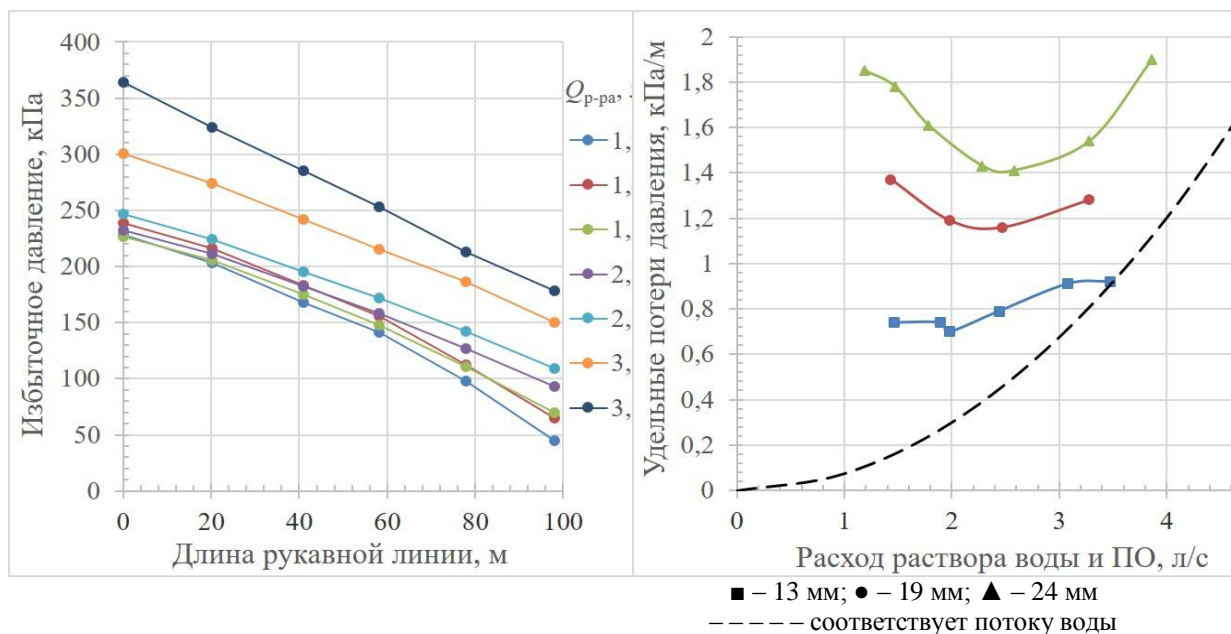


Рисунок 3. Изменение давления по длине рукавной линии при диаметре насадки пожарного ствола 24 мм

Рисунок 4. Зависимость удельных потерь давления от расхода раствора воды и ПО

В связи с этим дальнейшие исследования направлены на разработку инженерной методики гидравлического расчета рукавных линий ПССВ [6]. Для описания движения компрессионной пены принята квазигомогенная модель. Ее сущность заключается в том, что смесь компонентов считается гомогенной средой и скорости фаз равны. Модель включает в себя уравнения неразрывности и движения в одномерном виде, осредненные во времени и по сечению потока, а также уравнение состояния для воздуха.

По рассчитанным значениям избыточного давления в рукавной линии, а также известным значениям расходов компонентов компрессионной пены, посредством уравнений квазигомогенной модели были определены основные характеристики потока компрессионной пены в местах установки датчиков давления для каждой серии измерений: массовый и объемный расход, средняя скорость, газосодержание, плотность, вязкость, числа Рейнольдса и Фруда, приведенная плотность. Полученные значения позволили определить по диаграммам структур газожидкостных потоков, что поток компрессионной пены в горизон-

тальной рукавной линии имеет вспененную структуру. Помимо того установлено, что в проведенных экспериментах значению расхода раствора воды и ПО более 2 л/с соответствует значение газосодержания менее 0,75, а менее 2 л/с – более 0,75.

Для определения значений коэффициента гидравлического трения было использовано уравнение Альтшуля, так как для всех серий измерений значения числа Рейнольдса находились в диапазоне 120000–275000. Однако существенные различия (до 359 %) между значениями коэффициента гидравлического трения, рассчитанными по Альтшулю, и соответствующими результатам экспериментальных исследований еще раз подтвердили несостоятельность классических зависимостей для описания движения компрессионной пены. В этой связи квазигомогенная модель движения газожидкостной смеси была преобразована по аналогии с классической методикой гидравлического расчета рукавных линий путем введения приведенного коэффициента гидравлического трения, равного отношению коэффициента гидравлического трения к газосодержанию. Исследование

его зависимости от определяющих факторов газожидкостного потока (число Рейнольдса, число Фруда, приведенная плотность и газосодержание) позволило выявить явную зависимость приведенно-

го коэффициента гидравлического трения от газосодержания, которую аппроксимировали в практически значимом диапазоне значений газосодержания 0–0,9 (рисунок 5).

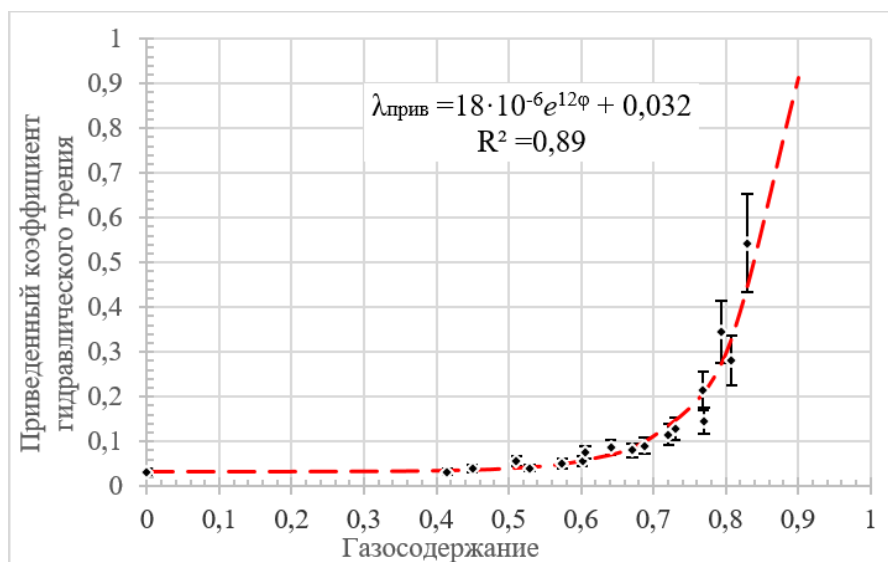


Рисунок 5. Зависимость приведенного коэффициента гидравлического трения от газосодержания

В результате аппроксимации получено выражение для определения приведенного коэффициента гидравлического трения от газосодержания, которое легло в основу инженерной методики гидравлического расчета рукавных линий ПССВ, предназначенной для оценки избыточного давления в рукавной линии по ее длине.

Исходными данными по методике являются: объемный расход воздуха при атмосферном давлении – $Q_{\text{возд}}$, м³/с; объемный расход раствора воды и ПО – Q_2 , м³/с; диаметр рукавной линии – D , м; длина рукавной линии – l , м; плотность раствора воды и ПО – ρ_2 , кг/м³; избыточное давление на входе в рукавную линию – $p_{\text{изб}}$, Па; атмосферное давление – $p_{\text{атм}}$, Па.

Для определения избыточного давления в противоположном сечении рассматриваемого участка рукавной линии длиной l необходимо:

1. Определить газосодержание компрессионной пены в начале рукавной линии по формуле

$$\varphi = \frac{Q_{\text{возд}} \cdot p_{\text{атм}}}{Q_{\text{возд}} \cdot p_{\text{атм}} + Q_2 \cdot (p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}})} \quad (1)$$

2. Рассчитать приведенный коэффициент гидравлического трения, используя выражение

$$\lambda_{\text{прив}} = 18 \cdot 10^{-6} e^{12\varphi} + 0,032. \quad (2)$$

3. Оценить удельные потери давления в рукавной линии как

$$\Delta p_{\text{уд}} = \frac{8\rho_2}{\pi^2 D^5} \lambda_{\text{прив}} Q_2^2. \quad (3)$$

4. Перейти к потерям давления на рассматриваемом участке рукавной линии по выражению

$$\Delta p = \Delta p_{\text{уд}} l. \quad (4)$$

5. Определить избыточное давление в противоположном сечении рас-

смаатриваемого участка рукавной линии по формуле

$$P_{\text{изб}}^l = P_{\text{изб}} - \Delta p. \quad (5)$$

Для проверки корректности разработанной инженерной методики гидрав-

лического расчета рукавных линий ПССВ проведены экспериментальные исследования движения компрессионной пены в рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм с использованием ПО Синтек (рисунки б).

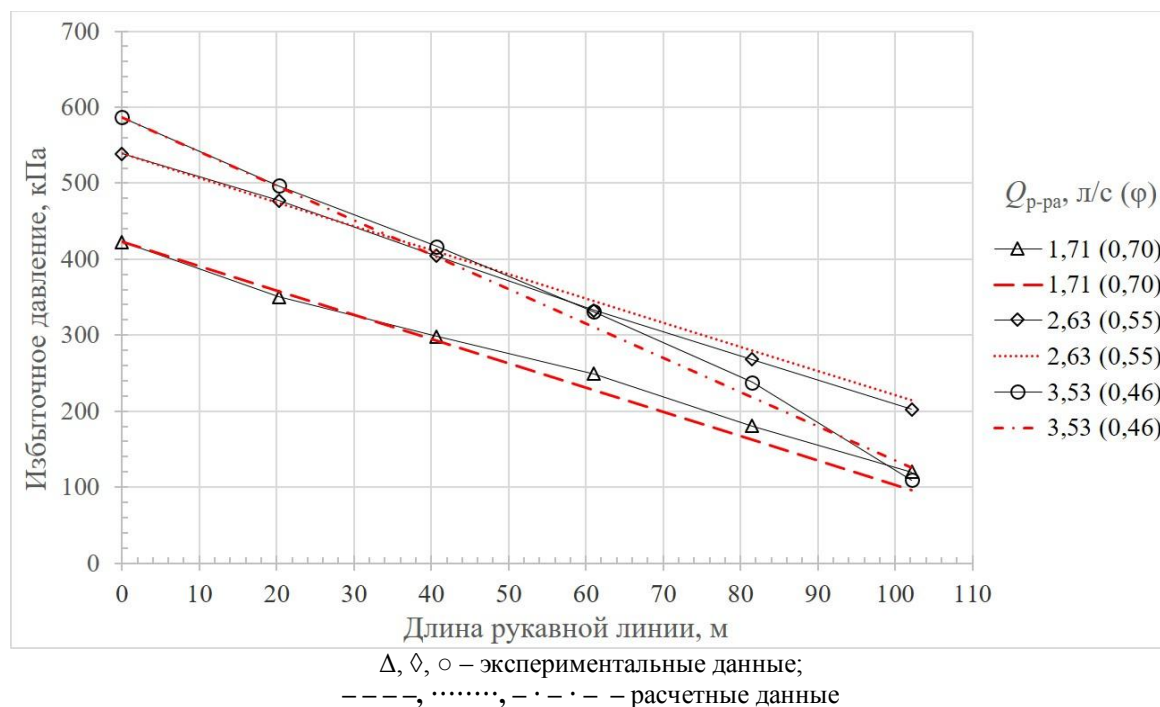


Рисунок 6. Экспериментальные и расчетные значения избыточного давления по длине рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм при диаметре насадка 24 мм

Сравнение значений удельных потерь давления в рукавных линиях, полученных по результатам экспериментальных исследований и результатам расчета с использованием разработанной инженерной методики (отличие составило не более 19%), позволило рекомендовать инженерную методику для гидравлического расчета рукавных линий ПССВ при движении по ним компрессионной пены с

целью определения тактико-технических характеристик ПССВ.

Для определения эффективности тушения пожаров ПССВ проведены сравнительные исследования тушения условных очагов пожара класса А компрессионной пеной и воздушно-механической пеной низкой кратности, полученной с использованием ручного воздушно-пенного ствола СВП-2 (рисунок 7) [1–3, 7].



Рисунок 7. Тушение условного очага пожара класса А

В качестве условных очагов пожара класса А использованы три штабеля из 15 автомобильных покрышек. Общая масса горючего материала одного штабеля составила около 100 кг. Помимо того, на штабель было нанесено 10 л горючей жидкости (смесь из 8 л отработанного моторного масла и 2 л бензина). Результаты сравнительных исследований эффективности тушения условного очага пожара класса А пеной низкой кратности сведены в таблицу.

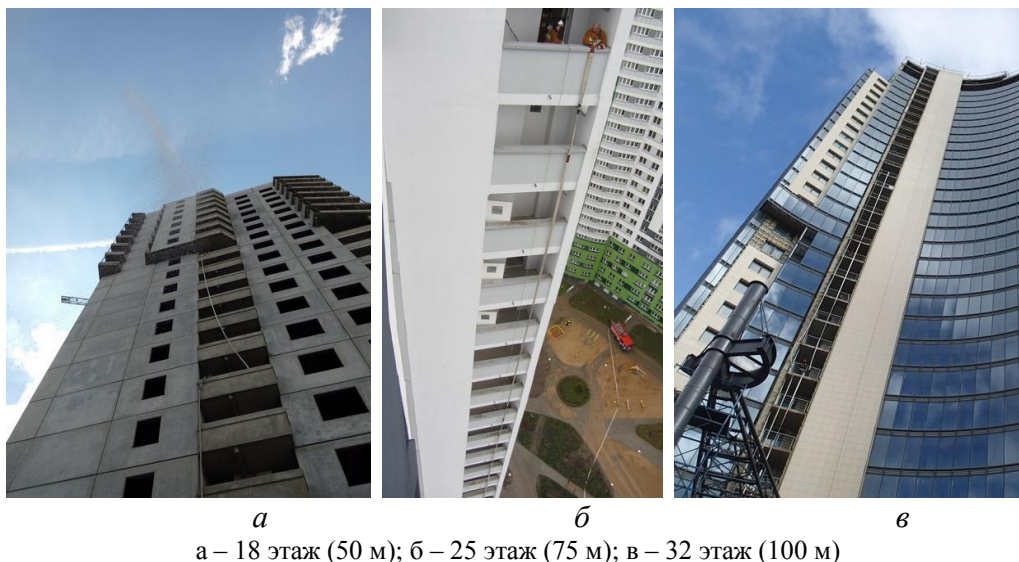
Таблица

Наименование параметра	Значение для ствола		
	СПРУ 50/0,7	Elkhart Brass ST-185A	СВП-2
Время тушения, с	23	20	55
Количество использованного на тушение ОПС-0.4, л	0,3	0,7	1,5
Количество использованной на тушение воды, л	76	70	150

Как видно из данных таблицы, на тушение условного очага пожара класса А компрессионной пеной потребовалось в 2 раза меньше времени и израсходовано в 2 раза меньше воды и до 5 раз меньше ПО, чем при использовании ствола СВП-2, что позволило говорить о превосходящей огнетушащей эффективности ПССВ над традиционными технологиями тушения пеной низкой кратности. При этом, для подачи компрессионной пены требуется в 2,5–3 раза меньшее количество ПО

(в практике используют растворы воды и ПО в концентрации: ОПС-0.4 – 1 %, Синтек и Барьер-пленкообразующий – 6 %), что говорит о снижении себестоимости пожаротушения при использовании ПССВ.

В рамках определения возможности использования ПССВ для тушения пожаров в высотных зданиях проведены натурные исследования по подаче компрессионной пены на 18, 25 и 32 этажи (рисунок 8) [7].



а – 18 этаж (50 м); б – 25 этаж (75 м); в – 32 этаж (100 м)

Рисунок 8. Натурные исследования подачи компрессионной пены на высоту

В качестве критерия эффективности рассмотрено значение высоты, на которую ПССВ может подать компрессионную пену, при избыточном давлении на насосе до 1000 кПа. В ходе натурных исследований компрессионная пена кратностью до 10 была подана на высоту 26 этажа (около 80 м), при этом значение удельных потерь давления находилось в диапазоне 5,6–6,7 кПа/м. Компрессионная пена кратностью 10–20 была подана на высоту 32 этажа (около 100 м), при этом значение удельных потерь давления находилось в диапазоне 4–5,6 кПа/м.

Важно отметить, что при подаче компрессионной пены на 18, 25 и 32 этажи высотных зданий перекрытие ручного пожарного ствола на время более минуты приводило к образованию в вертикальной рукавной линии воздушной пробки, что не позволяло мгновенно возобновить подачу компрессионной пены.

Проведены исследования по использованию ПССВ при низкой температуре окружающей среды ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) [7]. Рукавная линия состояла из двух пожарных напорных рукавов, была размещена на поверхности земли и заполнена компрессионной пеной под избыточным давлением 300 кПа. Для обеспечения герметичности рукавной линии были перекрыты ручной пожарный ствол и задвижка вы-

пускного патрубка ПССВ. По результатам исследований компрессионная пена в рукавной линии за 2 часа промерзла по диаметру поперечного сечения на глубину до 10 мм. При этом по периметру рукава образовался хрупкий пористый слой из замерзшей компрессионной пены, а в сердцевине рукава она осталась в жидкой фазе. Для восстановления работоспособности рукавной линии, в меру хрупкости замерзшего слоя компрессионной пены, достаточно было возобновить ее подачу.

Результаты натурных испытаний импортных ПССВ, находящихся на вооружении пожарных подразделений МЧС Республики Беларусь, наряду с анализом конструктивных особенностей и тактико-технических характеристик ПССВ позволили сформулировать основные требования к экспериментальному образцу отечественной ПССВ.

Совместно с учреждением «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь и ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» проведена научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа, в результате которой был разработан образец отечественной ПССВ на прицепном шасси ПССВ 4/7-50 (рисунок 9), на конст-

рукцию которого получен патент на полезную модель.



Рисунок 9. Внешний вид ПССВ 4/7-50

По итогам натурных испытаний с учетом зарубежного опыта использования ПССВ для тушения пожаров разработаны рекомендации по тушению пожаров с применением ПССВ.

Основные результаты исследований:

- разработана методика и проведены экспериментальные исследования, направленные на получение данных об изменении давления в рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм при движении по ней компрессионной пены при значениях объемного расхода раствора воды, ПО а воздуха, диаметрах насадка пожарного ствола, а также различных видах пенообразователя. Установлено, что зависимость избыточного давления от длины рукавной линии при газосодержании 0,75 и менее имеет линейный вид, а более 0,75 – нелинейный (квадратичный), при этом вид пенообразователя не влияет на значение потерь давления при движении в рукавной линии компрессионной пены [4, 5];

- во время проведения экспериментов визуально обнаружено, что при достижении некоторого минимального значения концентрации пенообразователя при постоянных расходных и геометрических параметрах поток компрессионной пены приобретает пробковую структуру, что приводит к прекращению подачи компрессионной пены из пожарного ствола. В результате анализа экспериментальных данных и диаграмм структур га-

зожидкостных потоков определено, что поток компрессионной пены в рукавной линии при минимально допустимом значении концентрации пенообразователя имеет вспененную структуру [7];

- квазигомогенная модель позволила описать движение компрессионной пены по рукавным линиям, однако в диапазоне значений числа Рейнольдса 120000–275000 определение коэффициента гидравлического трения по формуле Альтшуля дает отличие до 359 % от значений, соответствующих экспериментальным данным, что говорит о невозможности использования классических зависимостей коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса и относительной шероховатости [6];

- инженерная методика гидравлического расчета рукавных линий пеногенерирующих систем со сжатым воздухом, в основу которой положена квазигомогенная модель движения газожидкостных смесей и эмпирическая зависимость для определения приведенного коэффициента гидравлического трения от значения истинного газосодержания в практически значимом диапазоне от 0 до 0,9, полученная в ходе анализа экспериментальных данных для рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм. Корректность методики проверена посредством сопоставления результатов экспериментальных исследований для рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм и расчетов

по разработанной инженерной методике. Отличие составило не более 19 % [6];

– сравнительные исследования эффективности тушения условного очага пожара класса А пеной низкой кратности показали, что при подаче компрессионной пены потребовалось в 2 раза меньше времени и израсходовано в 2 раза меньше воды и в 5 раз меньше пенообразователя,

чем при использовании ствола СВП-2 [1–3]. Установлена возможность подачи мокрой компрессионной пены на высоту до 75 м, а сухой – до 100 м, а также возможность использования пеногенерирующих систем в условиях низких температур без образования ледяных пробок в рукавной линии [7].

Литература

1. Навроцкий О.Д. Исследование параметров пены, подаваемой с помощью пеногенерирующих систем со сжатым воздухом // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2011. № 2 (30). С. 125–132.
2. Навроцкий О.Д. и др. Пеногенерирующие системы со сжатым воздухом – средство пенного пожаротушения нового поколения // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2012. № 1 (15). С. 22–31.
3. Мазуренко М.В. и др. Эффективность тушения пожаров с помощью пеногенерирующих систем со сжатым воздухом // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2012. № 2 (32). С. 133–139.
4. Навроцкий О.Д. и др. Описание экспериментальной установки для исследования движения пены в горизонтальном цилиндрическом канале // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2015. № 1(21). С. 47–53.
5. Грачулин А.В. Экспериментальные исследования движения компрессионной пены в горизонтальном цилиндрическом канале // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2016. № 1(23). С. 68–77.
6. Камлюк А.Н., Грачулин А.В. Инженерная методика гидравлического расчета прорезиненных рукавных линий пеногенерирующих систем со сжатым воздухом // Вестник фонда фундаментальных исследований. 2017. № 1. С. 51–62.
7. Камлюк А.Н., Навроцкий О.Д., Грачулин А.В. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2017. № 1 (1). С. 44–53.

References

1. Nawrotskij O.D., Zanevskaja Ju.V., Karpenchuk I.V., Emel'janov V.K., Grachulin A.V. Issledovanie parametrov peny, podavaemoy s pomoshch'yu penogeneriruyushchikh sistem so szhatym vozdukhom [Research foam parameters supplied by compressed air foam systems]. Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya. 2011. No. 2 (30). Pp. 125-132. (rus)
2. Nawrotskij O.D., Zanevskaja Ju.V., Emel'janov V.K., Kamluk A.N., Karpenchuk I.V., Grachulin A.V. Penogeneriruyushchie sistemy so szhatym vozdukhom – sredstvo pennogo pozharotusheniya novogo pokoleniya [Compressed air foam systems – tool a new generation of foam extinguishing]. Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'. 2012. No. 1 (15). Pp. 22-31. (rus)
3. Mazurenko M.V., Navrockij O.D., Palubec S.M., Grachulin A.V., Zaharova M.V. Jefferktivnost' tusheniya pozharov s pomoshh'ju penogeneriruyushchih sistem so szhatym vozduhom [The effectiveness of extinguishing fires with compressed air foam systems]. Chrezvychajnye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya. 2012. No. 2 (32). Pp. 133-139. (rus)
4. Navrockij O.D. Kamluk A.N., Parmon V.V., Grachulin A.V., Korsakov S.M. Opisaniye jeksperimental'noj ustanovki dlja issledovaniya dvizheniya peny v gorizont'al'nom cilindricheskom kanale [Description of the experimental installation for studying the movement of foam in a horizontal cylindrical channel]. Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'. 2015. No. 1 (21). Pp. 47-53. (rus)
5. Grachulin A.V. Jeksperimental'nye issledovaniya dvizheniya kompressionnoj peny v gorizont'al'nom cilindricheskom kanale [Experimental studies of the motion of compression foam in a horizontal cylindrical channel]. Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'. 2016. No. 1 (23). Pp. 68-77. (rus)
6. Kamluk A.N., Grachulin A.V. Inzhenernaya metodika gidravlicheskogo rascheta prorezinennykh rukavnykh linij penogeneriruyushchih sistem so szhatym vozdukhom [Engineering method of hydraulic calculation of rubber hose lines of compressed air foam system]. Vestnik fonda fundamental'nykh issledovaniy. 2017. No. 1. Pp. 51-62. (rus)

7. Kamluk A.N., Nawrotskij O.D., Grachulin A.V. Tushenie pozharov penogenerirujushhimi sistemami so szhatym vozduhom [Fire extinguishing by compressed air foam systems]. Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashhity MChS Belarusi. 2017. No. 1 (1). Pp. 44-53. (rus)