

УДК 532.529.5 : 614.844.5

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЕНЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Пармон В.В.*, к.т.н., Камлюк А.Н.*, к.ф.-м.н., доцент,
Грачулин А.В.*, Корсаков М.С. *, Навроцкий О.Д.***, к.т.н.

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь
**Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций

e-mail: mail@kii.gov.by

Авторами предложена экспериментальная установка для исследования движения воды и пены по рукавной системе пеногенерирующих систем со сжатым воздухом. Описан принцип работы данной установки. Экспериментально определены потери давления при движении воды по рукавной линии. Проведено сравнение результатов эксперимента с расчетными данными.

The authors propose the experimental setup for investigation of the movement of water and foam in the hose line of compressed air foam system. Describes the principle of operation of the setup. Experimentally determined pressure drop when water moves in the hose line. Compared the experimental results with the calculated values.

(Поступила в редакцию 12 января 2015 г.)

Введение. Использование компрессионной пены, полученной с помощью пеногенерирующих систем со сжатым воздухом (далее – ПССВ), является одним из перспективных способов тушения пожаров класса А (твердые вещества) и класса В (жидкие вещества). Результаты проведенных ранее исследований показывают, что ПССВ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями пожаротушения [1, 2]. Принцип получения пены в ПССВ заключается в принудительном введении воздуха под давлением в раствор пенообразователя с помощью компрессора. ПССВ является многофункциональным устройством, так как она может использоваться для подачи пены, чистой воды, раствора смачивателя или воздуха для работы пневматического аварийно-спасательного инструмента. Наряду с традиционными областями применения пены, благодаря своим свойствам область применения компрессионной пены может быть расширена. Предлагается использовать компрессионную пену для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности (до 400 метров высотой) [3, 4] и тушения пожаров в резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов методом введения пены в слой горючей жидкости (подслоное тушение) [5].

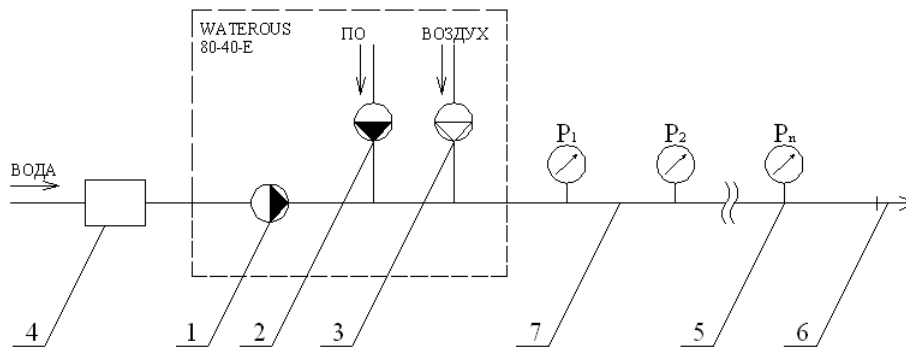
Основными компонентами ПССВ являются центробежный насос, источник воды (цистерна), источник пенообразователя (бак для пенообразователя), воздушный компрессор, система дозирования с прямым впрыском пенообразователя на выходе из центробежного насоса, смесительная камера и устройство контроля за правильным смешиванием пенообразователя, воды и воздуха.

В отличие от стандартных насосных установок в ПССВ по рукавной линии подается пена, которая имеет массу меньшую, чем у воды. Наличие в пене воздуха обуславливает ее сжимаемость и, как следствие, не однородность смеси по длине рукавной линии. В настоящее время движение двухфазных потоков огнетушащих веществ по рукавным линиям слабо изучено. Отсутствуют какие-либо данные о механизме их течения и определении гидродинамического сопротивления при движении пены в практике пожаротушения.

С целью исследования движения пены в горизонтальном цилиндрическом канале авторами статьи предлагается экспериментальная установка для определения

гидравлических потерь в рукавной линии. Это позволит определить тактико-технические возможности ПССВ. Для оценки правильности получаемых экспериментальных данных и определения возможности использования предлагаемой экспериментальной установки для исследования движения пены, авторами проведен ряд измерений потерь давления при движении в рукавной линии воды. Полученные экспериментальные результаты сравнили с расчетными данными.

Описание экспериментальной установки. Основной целью экспериментальных исследований является определение гидравлических потерь в рукавной системе при движении пены. С этой целью в состав экспериментальной установки включены ПССВ, рукавная линия с пожарным стволом, а также средства измерения давления и расхода. Общая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.



1 – водяной насос; 2 – насос пенообразователя; 3 – компрессор; 4 – электромагнитный расходомер; 5 – манометр; 6 – пожарный ствол; 7 – рукавная линия

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Для получения пены и подачи ее по рукавной линии в экспериментальной установке использовалась портативная ПССВ Waterous 80-40-E (рис. 2), установленная на автомобиль быстрого реагирования АБР-0,4/130 (4370), находящийся в учебной аварийно-спасательной части Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь.



Рисунок 2 – Вид экспериментальной установки

Технические характеристики основных агрегатов портативной ПССВ Waterous 80-40-E приведены в таблице 1.

Стоит отметить, что портативная установка Waterous 80-40-E оборудована системой балансирования давления воды и воздуха Auto-Sync. В рабочем режиме работы системы давление воздуха должно находиться в пределах плюс 5 % от давления воды. Система осуществляет регулирование давления воды и воздуха в пределах от 40-150 PSI (275,6-1033,5 кПа). Помимо того, в руководстве по эксплуатации ПССВ Waterous 80-40-E приведено, что оптимальная производительность ПССВ соответствует диапазону давлений от 0,55 МПа до 0,85 МПа.

Таблица 1 – Технические характеристики основных агрегатов портативной установки Waterous 80-40-E

Наименование агрегата	Технические характеристики
Водяной насос	Расход воды не менее 5 л/с; Развиваемое давление до 150 PSI (1033,5 кПа).
Компрессор	Расход атмосферного воздуха до 20 л/с; Развиваемое давление до 150 PSI (1033,5 кПа).
Система дозирования пенообразователя Aquis™ 1.5	Автоматический режим: обеспечивается концентрация пенообразования 0,1-1 % Развиваемое давление 400-450 PSI (2756-3100,5 кПа).

Примечание. Технические характеристики насоса и компрессора взяты из руководства по эксплуатации ПССВ Waterous 80-40-E. Технические характеристики системы дозирования пенообразователя Aquis™ 1.5 взяты из руководства по эксплуатации на данную систему дозирования пенообразователя.

Встроенная в портативную ПССВ Waterous 80-40-E система дозирования пенообразователя Aquis™ 1.5 (рис. 3), может работать в автоматическом и ручном режимах.



Рисунок 3 – Система дозирования пенообразователя Aquis™ 1.5

Информация о расходе пенообразователя данной системой в ручном режиме отсутствует. В связи с этим расход был определен эмпирическим путем. Для этого запустили пенный насос (система дозирования пенообразователя работает от аккумуляторной батареи ПССВ), пенообразователь поступал в напорный патрубок и из него вытекал в емкость, рукоятку регулировки концентрации пенообразователя установили в положение 0,1 % и после того, как поток пенообразователя становился равномерным, под струю пенообразователя подставляли мерную емкость и засекали время. Расход пенообразователя определяли делением его объема в мерной емкости на время заполнения. Аналогично определяли расход пенообразователя, соответствующий другим положениям рукоятки регулировки концентрации пенообразователя (таблица 2).

Таблица 2 – Расход системы дозирования пенообразователя Aquis™ 1.5 при работе в ручном режиме

Положение рукоятки Aquis™ 1.5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Расход пенообразователя, л/с	0,001	0,005	0,013	0,022	0,030	0,038	0,046	0,052	0,060	0,060

Выбор пожарных напорных рукавов для использования в экспериментальной установке осуществляли из наиболее распространенных и часто используемых пожарными подразделениями МЧС Республики Беларусь: с внутренним диаметром 51, 66 и 77 мм. Исходя из расходов насоса и компрессора ПССВ, в рукавной линии применены рукава диаметром 51 мм, длина рукавов стандартная – 20 м. Стоит отметить, что используемые ПССВ и пожарный ствол иностранного производства, и в них предусмотрен американский тип соединения. Для присоединения рукавной линии к ПССВ и пожарному стволу авторами в Командно-инженерном институте были разработаны специальные переходные устройства (рис. 4), имеющие с одной стороны американский тип соединения, а со второй – соединительную головку ГМ-50.



Рисунок 4 – Переходные устройства с американского типа соединения к ГМ-50

В экспериментальной установке использовался перекрывной пожарный ствол модели «Elkhart Brass ST-185A» (рис. 5). Данная модель позволяет изменять диаметр spryska ствола посредством смены используемых насадок: 13, 24 и 38 мм. Это в свою очередь дает возможность исследовать движение пены по рукавной линии при различных соотношениях давления и расхода.



Рисунок 5 – Перекрывной пожарный ствол модели «Elkhart Brass ST-185A»

Для определения манометрического напора в рукавной линии между рукавами размещались специальные вставки с манометрами МП 160 МЧ-1.0 МПа (рис. 6). Данные манометры имеют класс точности 0,6, с погрешностью измерения ± 6 кПа.

Для определения расхода воды использовался расходомер-счетчик электромагнитный «Взлет ЭМ» (рис. 7). Расходомер предназначен для измерения среднего объемного расхода и объема различных электропроводящих жидкостей в широком диапазоне температур и вязкостей в различных условиях эксплуатации. Чувствительность расходомера по скорости потока составляет 0,02 м/с. Расходомер устанавливался в линию, подводящую воду к насосу из внутренней водопроводной сети.



Рисунок 6 – Вставка с манометром



Рисунок 7 – Электромагнитный расходомер «Взлет ЭМ»

Результаты и обсуждение. Принцип работы экспериментальной установки заключается в следующем:

- забор воды осуществляется из внутренней водопроводной сети, причем вода до попадания во всасывающую полость водяного насоса проходит через электромагнитный расходомер;

- из водяного насоса вода поступает в подающий трубопровод, на котором установлен клапан впрыска в поток воды пенообразователя (под давлением 2 756-3 100,5 кПа) и клапан ввода в раствор воды и пенообразователя сжатого воздуха, и как результат из подающего трубопровода в рукавную линию подается пена;

- после того, как поток пены переходит в равномерный и установившийся режим, фиксируются показания манометров (разница между значениями давления и есть потери давления по длине рукава).



Рисунок 8 – Отбор пены для определения кратности

Помимо того для определения газосодержания смеси (кратность пены) необходимо произвести отбор пены из рукавной линии в мерную емкость (рис. 8). Кратность пены определяется по формуле (1):

$$K = \frac{V_{\text{пены}}}{V_{\text{раствора}}} = \frac{V_{\text{пены}} \cdot \rho_{\text{раствора}}}{m_{\text{раствора}}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{пены}}$ – объем пены, дм^3 ;

$m_{\text{раствора}}$ – масса раствора пенообразователя, кг;

$\rho_{\text{раствора}}$ – плотность раствора пенообразователя, кг/дм^3 .

Проводится не менее трех измерений. За результат принимают среднее арифметическое результатов трех испытаний.

Рассмотрим результаты, полученные на экспериментальной установке, при движении по рукавной линии воды. Расход воды при этом составлял 3,42 л/с. Потери давления при движении по рукавной линии воды показаны на рис. 9.

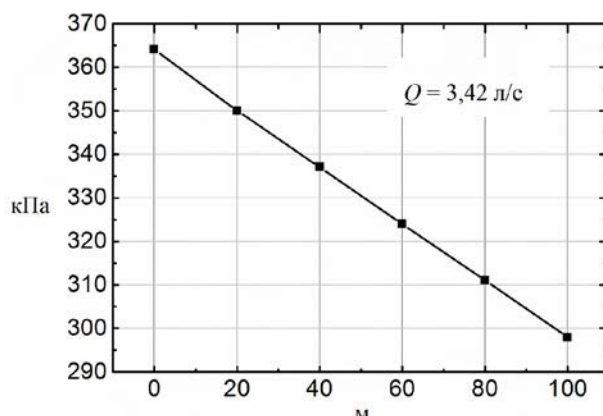


Рисунок 9 – Потери давления при движении по рукавной линии воды

Как видно из рис. 9 зависимость имеет линейный вид. Тангенс угла наклона определяет потери давления на единице длины рукавной линии. Они составили:

$$\Delta p_9 = \frac{364 - 298}{100} = 660 \text{ Па/м.} \quad (2)$$

Потери давления обусловлены характером движения воды по рукавной линии и сопротивлением самих рукавов. Общее давление в системе (высота расположения прямой на рис. 9) зависит от давления перед стволом, которое в нашем случае (при расходе воды 3,42 л/с) составило 298 кПа.

Определенные экспериментально потери давления на единице длины рукавной линии Δp_9 (2) оценим аналитически по формуле Дарси-Вейсбаха [6]:

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2}{d} \quad (3)$$

где Δp – потери давления на единице длины рукавной линии, Па/м;
 λ – коэффициент гидравлического трения;
 ρ – плотность воды, кг/м³;
 v – скорость движения воды по рукавам, м/с;
 d – внутренний диаметр рукава, м.

Определим скорость движения воды по рукавам:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2} = 1,665 \text{ м/с.} \quad (4)$$

где Q – расход воды через рукавную линию, м³/с;
 A – площадь поперечного сечения рукава, м².

Для определения коэффициента гидравлического трения необходимо вычислить число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\nu} = 84\,424, \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Теперь определяем по [7, табл. 2.7] эквивалентную шероховатость прорезиненных рукавов $\Delta_9 = 128$ мкм. Исходя из значения числа Рейнольдса (5) и эквивалентной шероховатости, определяем коэффициент гидравлического трения по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_9}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,026, \quad (6)$$

где d – внутренний диаметр рукава, мм;

Δ_9 – эквивалентную шероховатость прорезиненных рукавов, мм.

Подставив полученные в формулах (4) и (6) значения в формулу (3), получим, что потери давления на единице длины $\Delta p = 705$ Па/м. Погрешность экспериментальных и расчетных данных составляет 6,4 %. Это позволяет говорить о возможности использования предлагаемой экспериментальной установки для исследования движения пены по рукавной системе ПССВ.

Заключение. Таким образом, в работе предложена экспериментальная установка для исследования движения воды и пены по рукавной системе ПССВ. Показана общая схема данной установки, а также дано описание и приведены технические характеристики основных узлов и агрегатов. Описан принцип работы экспериментальной установки. Для оценки правильности получаемых экспериментальных данных и определения возможности

использования предлагаемой экспериментальной установки для исследования движения пены, авторами проведен ряд измерений потерь давления при движении в рукавной линии воды. Экспериментально определенные потери давления на единицу длины рукавной линии составили $\Delta p_э = 660$ Па/м, а расчетные $\Delta p = 705$ Па/м. Погрешность составила 6,4 %. Проведенный эксперимент показал, что предлагаемая экспериментальная установка может быть использована с целью исследования движения пены по рукавной системе ПССВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант Ф13М-006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование параметров пены, подаваемой с помощью пеногенерирующих систем со сжатым воздухом / О.Д. Навроцкий [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация – 2011. – № 2 (30). – С. 125–132.
2. Пеногенерирующие системы со сжатым воздухом – средство пенного пожаротушения нового поколения / О.Д. Навроцкий [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь – 2012. – № 1 (15). – С. 22–31.
3. Возможность использования пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях / П.С. Махачей [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Сборник тезисов докладов VI междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня. 2011 г.: в 2 т. / М-во чрезв. ситуаций Респ. Беларусь; редкол.: А.Ю. Лупей [и др.] – Минск, 2011. – Т. 2 – С. 45–48.
4. Record height with sky CAFS. [Electronic resource]. // Rosenbauer. – Mode of access: <http://rosenbauer.t3.world-direct.at/en/landing-pages-newsletter/2010-08-newsletter-rbi/record-height-with-sky-cafs>. – Date of access: 05.01.2015.
5. Малашенко, С.М. Устройство врезки в продуктопровод для подачи воздушно-механической огнетушащей пены в горящий резервуар / С.М. Малашенко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2 (32). – С. 148–156.
6. Рабинович, Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М.: «Недра», 1978. – 304 с.
7. Вильнер, Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев, Б.Б. Некрасов; под ред. Б.Б. Некрасова. – Минск: «Вышэйш. школа», 1976. – 416 с.
8. Ольховский, И.А. Технология применения рукавных систем с пропускной способностью более 100 л/с для тушения пожаров на объектах энергетики: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / И.А. Ольховский. – М., 2014. – 145 с.