

**Литература:**

1. Финансовый директор [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://findirector.by/news/vpervye-za-12-let-vyuchka-pvt-prevysila-1-mlrd-usd->. — Дата доступа: 13.06.2018.

2. Цифры и факты // Парк высоких технологий [Электронный ресурс]. — 2018. — Режим доступа: <http://www.park.by/cat-3/>. — Дата доступа: 16.06.2018.

3. Братимов, О. В. Практика глобализации: игры и правила новой эпохи / О. В. Братимов и др.; под ред. М. Г. Деягина. — М., 2000. — С. 15.

4. Кара-Мурза, А. А. «Новое варварство» как проблема российской цивилизации / А. А. Кара-Мурза. — М., 1995. — 164 с.

5. Янченко, Е. В. Роль ТНК в глобальном инновационном процессе / Е. В. Янченко [Электронный

ресурс] / Режим доступа: [http://media.miu.by/files/store/items/uses/xviii/mim\\_uses\\_xviii\\_02024.pdf](http://media.miu.by/files/store/items/uses/xviii/mim_uses_xviii_02024.pdf). Дата доступа: 19.08.2016.

6. ModernizationvsGlobalization [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://tulaneict4d.wordpress.com/2014/02/07/modernization-globalization/> — Дата доступа: 19.08.2016.

7. Тюпакова, Н. Н. Проблемы налогового регулирования инвестиционных процессов в экономике России / Н. Н. Тюпакова [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://teoria-practica.ru/rus/files/arhiv\\_zhurnala/2011/2/ekonomika/tyupakova.pdf](http://teoria-practica.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/2011/2/ekonomika/tyupakova.pdf). — Дата доступа: 19.08.2016.

8. InnovationStatistics [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Innovation\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Innovation_statistics). — Дата доступа: 19.08.2016.

УДК 614.844.6

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ПЕННЫХ ПОЖАРНЫХ ОРОСИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**INNOVATIVE WAY TO OPTIMIZE THE DESIGN OF FOAM FIRE SPRINKLERS WITH THE HELP OF ADDITIVE TECHNOLOGIES**

**А. Н. Камлюк,**

заместитель начальника Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, канд. физ.-мат. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

**А. О. Лихоманов,**

адъюнкт Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

**A. Kamluk,**

the Deputy Head of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, PhD in physico-mathematical sciences, associate professor, Minsk, Republic of Belarus

**A. Likhmanau,**

PhD student of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 03.08.2018 г.

В статье описан способ исследования кратности и устойчивости пены в зависимости от геометрических параметров пожарного оросителя, изготавливаемого при помощи аддитивных технологий. Представлены результаты экспериментов по влиянию коэффициента рабочей поверхности разбрызгивателя оросителя на кратность и устойчивость пены.

This article is devoted to the method for studying the dependence of the foam expansion rate and stability on the fire sprinkler geometric parameters with the help of additive technologies. The results of experimental studies on the effect of the sprayer working surface factor of the sprinkler on the foam expansion rate and stability are presented.

Ключевые слова: автоматические установки пожаротушения, пена, ороситель, кратность пены, устойчивость пены, аддитивные технологии.

Keywords: automatic fire suppression systems, foam, sprinkler, foam expansion rate, foam stability, additive technologies.

*Введение.*

Автоматические установки пожаротушения в современном мире являются неотъемлемой частью системы обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений. Такие установки позволяют на начальной стадии пожара без участия человека определить факт возникновения горения и произвести его ликвидацию. Важным этапом при проектировании данных систем является выбор типа огнетушащего вещества в зависимости от вида пожарной нагрузки, находящейся в защищаемом объеме. В частности, для тушения пожаров горючих жидкостей на химических, нефтеперерабатывающих и металлургических предприятиях, в складских помещениях, на объектах энергетической промышленности и др. применяют воздушно-механическую пену низкой кратности ( $K < 20$ ). В сфере пожарной безопасности под кратностью  $K$  понимается отношение объема пены к объему раствора пенообразователя, из которого она получена. Для генерирования пены низкой кратности в большинстве случаев применяют оросители розеточного типа. Это обусловлено простотой их конструкции, что удешевляет процесс производства, монтажа и обслуживания по сравнению с иными видами оросителей и пеногенераторов. Вместе с тем значения кратности пены при использовании розеточных оросителей недостаточно высоки (не превышают 7), что приводит к случаям, когда установки пожаротушения не справляются со своими функциями [1]. Повысить кратность генерируемой пены можно путем изменения конструкции оросителя [2, 3]. В частности, научный интерес представляет влияние конструктивных особенностей розетки оросителя как главного пенообразующего фактора на качество получаемой пены [4]. Под качеством пены подразумевается не только ее кратность, но и устойчивость. Устойчивость  $S$  пены является обратной величиной средней интенсивности разрушения, которая показывает насколько уменьшается единица объема пены за единицу времени. Данная величина наряду с кратностью является главной качественной характеристикой воздушно-механической пены [2, 5]. В настоящее время недостаточно теоретических и практических данных о влиянии геометрических параметров элементов оросителей на кратность и устойчивость пены, что ограничивает возможность их оптимизации для повышения эффективности тушения.

На сегодняшний день процесс образования пузырьков воздушно-механической пены еще не поддается моделированию ввиду достаточной сложности протекающих при этом физико-химических, физико-технических и других процессов [5, 6]. В связи с этим исследовать влияние механизма образования пены в розеточных оросителях на ее качественные характеристики можно исключительно экспериментальным путем. Следовательно, основная задача заключается в создании оросителей с различными геометрическими параметрами и экспериментальном определении влияния каждого параметра в отдельности на характеристики генерируемой пены. Процесс производства нетиповых конструкций оросителей широко используемым способом отливки из металлов и последующей механической обработкой является дорогостоящим и трудоемким. Ввиду этого принято решение об изготовлении оросителей при помощи аддитивных технологий (3D-печать по технологии FDM (Fused Deposition Modeling)) [7]. Печать по технологии FDM представляет собой создание объемных объектов путем последовательного нанесения слоев материала (как правило, термoplastичные полимеры), повторяющих контуры цифровой модели. Данная технология позволяет производить быстрое прототипирование объектов любой формы, являясь недорогой альтернативой стандартным методам при создании мелкосерийных партий. По этой причине данный способ изготовления принят для создания ряда отличных друг от друга конфигураций оросителей для проведения экспериментальных исследований и последующей оптимизации конструкции.

*Конструкция сборно-разборного оросителя и изготовление его элементов с помощью 3D-печати.*

Как было отмечено выше, для проведения запланированных исследований необходимо создание большого количества оросителей, имеющих различные геометрические параметры. Для данных целей применение известной стандартной монолитной конструкции розеточного оросителя является нецелесообразным в связи с невозможностью ее разборки на составные элементы и их замены. Более рациональным с точки зрения практичности, экономии материалов и времени будет применение сборно-разборного оросителя согласно [8]. Конструктивное испол-

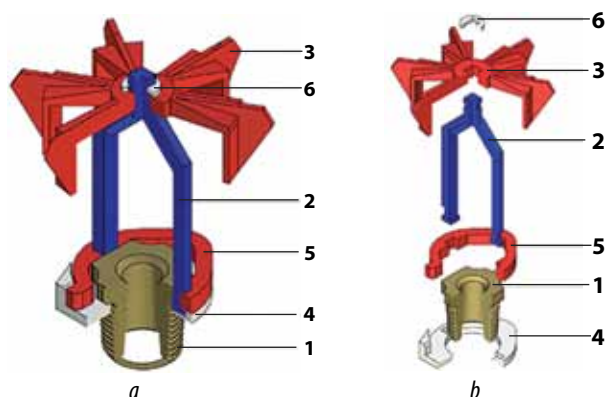


Рис. 1. Сборно-разборный ороиситель в собранном (а) и разобранном (b) виде: 1 — штуцер; 2 — держатель; 3 — разбрызгиватель; 4 — кольцевой фиксатор; 5 — дугообразный прижим; 6 — стопорная шайба

нение такого оросителя позволяет производить его разборку на составные элементы, замену любого из них и повторную сборку (рис. 1).

Для изготовления элементов сборно-разборного оросителя (см. рис. 1) в работе [7] проведен выбор оптимального по физико-механическим свойствам и цене материала — PLA-пластик (полилактид). Необходимая прочность и упругость элементов достигнута путем регулирования качества 3D-печати. В связи с тем, что качество печати напрямую зависит от ряда технологических параметров (толщина слоя  $h_{\text{слоя}}$ , температура экструдера  $T_э$ , скорость экструдера  $v$  и температура рабочего стола  $T_c$ ), опытным путем установлены их оптимальные значения для изготовления элементов оросителя необходимой прочности и упругости (табл. 1). Данные технологические параметры для экономии времени и материала были изменены (в сторону ухудшения) по сравнению с теми, что применялись при печати точного аналога металлического пожарного оросителя в [7] ( $h_{\text{слоя}} = 0,1$  мм,  $T_э = 210$  °С,  $v = 80$  мм/с,  $T_c = 70$  °С). Снижение качества печати стало возможным ввиду упрощения конструк-

ции сборно-разборного оросителя, что в свою очередь позволило изготовить его элементы так, чтобы они воспринимали нагрузку вдоль слоев печати в отличие от элементов аналога металлического оросителя. При этом известно, что созданные по технологии FDM объекты, воспринимающие нагрузку вдоль слоев печати, в 2,8 раза прочнее тех, что нагружаются поперек слоев [7].

Таким образом, при помощи 3D-печати изготовлены элементы оросителя с различными геометрическими параметрами (показаны на рис. 2):  $L = 30, 50, 80, 100, 150$  мм;  $d = 16, 24, 34, 44$  мм;  $\tau = 18^\circ, 24^\circ, 30^\circ, 36^\circ, 42^\circ$ ;  $D = 20, 30, 50, 70, 80, 100$  мм;  $h = 0, 2, 5, 10, 15$  мм;  $\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ . Ороситель со значениями параметров элементов  $L = 50$  мм,  $d = 16$  мм,  $\tau = 30^\circ$ ,  $D = 50$  мм,  $h = 0$  мм,  $\alpha = 90^\circ$  принят за базовый. В связи с этим при исследовании влияния определенного параметра (например, внутреннего диаметра  $d$ ) остальные ( $L, \tau, D, h$  и  $\alpha$ ) остаются постоянными и равными базовым значениям. Диапазоны вышеуказанных параметров элементов выбраны на основе анализа конструкций существующих розеточных оросителей с учетом целесообразности применения в автоматических установках пожаротушения.

Применение изготовленных элементов в составе сборно-разборной конструкции оросителя (см. рис. 1) позволяет создать 115 различных конфигураций. Это в очередной раз подтверждает преимущество данной конструкции над монолитной металлической, так как для проведения аналогичного эксперимента понадобилось бы изготовить 115 отдельных оросителей.

Таким образом, можно отметить, что предложенная сборно-разборная конструкция оросителя, включающая в себя изготовленные при помощи 3D-печати элементы из PLA-пластика, значительно упрощает и делает более удобными исследования процесса образования воздушно-механической пены в розеточных оросителях.

Таблица 1

Технологические параметры 3D-печати элементов сборно-разборного оросителя

Параметр	Значение
Толщина слоя $h_{\text{слоя}}$ , мм	0,2
Температура экструдера $T_э$ , °С	205
Скорость печати $v$ , мм/с	100
Температура рабочего стола $T_c$ , °С	70

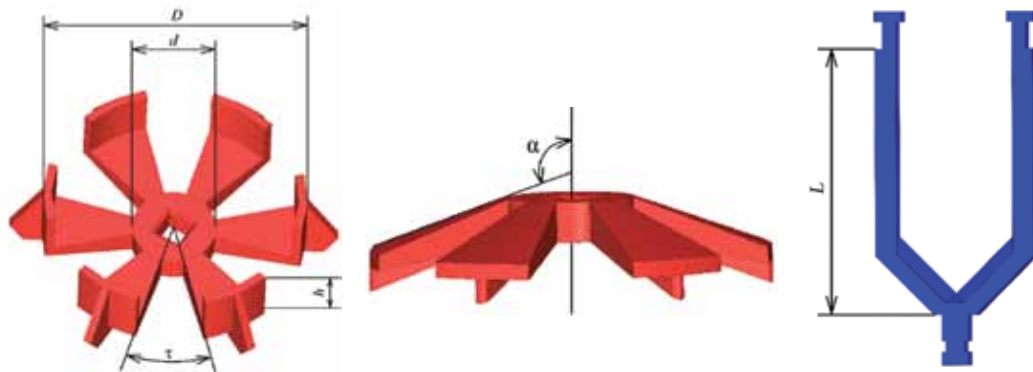


Рис. 2. Геометрические параметры элементов оросителя:  $D$  — внешний диаметр разбрызгивателя;  $d$  — внутренний диаметр разбрызгивателя;  $h$  — высота выступов разбрызгивателя;  $\tau$  — угловой шаг лопастей разбрызгивателя;  $\alpha$  — угол конусности разбрызгивателя;  $L$  — длина держателя

Методика и результаты экспериментальных исследований.

В данной работе приведены результаты исследований по изучению влияния площади рабочей поверхности разбрызгивателя на качественные характеристики пены ( $K$  и  $C$ ). Для сравнительного анализа удобно использовать коэффициент рабочей поверхности разбрызгивателя  $S$ , который определяется по формуле:

$$S = \frac{S_{\text{зап}}}{S_{\text{незап}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $S_{\text{зап}}$  и  $S_{\text{незап}}$  — площадь заполненной и незаполненной части поверхности разбрызгивателя, соответственно,  $\text{мм}^2$  (рис. 3).

Регулировать величину коэффициента рабочей поверхности разбрызгивателя  $S$  в предложенной конструкции сборно-разборного оросителя можно двумя способами: путем изменения внутреннего диаметра разбрызгивателя  $d$  либо углового шага лопастей  $\tau$  (рис. 3).

Рассчитанные значения коэффициента  $S$  в зависимости от значения изменяемого параметра представлены в табл. 2.

Методика эксперимента заключалась в определении массы воздушно-механической пены, сгенерированной сборно-разборным оросителем, а также времени разрушения 25 % ее объема. Время разрушения полученной пены характеризует ее устойчивость, а масса необходи-

Таблица 2

Значения изменяемых параметров разбрызгивателя и соответствующие им коэффициенты рабочей поверхности

Параметр разбрызгивателя	Внутренний диаметр $d$ , мм				Угловой шаг лопастей $\tau$ , град.				
	16	24	34	44	18	24	30	36	42
Значение параметра									
Коэффициент рабочей поверхности разбрызгивателя, %	55,1	61,5	73,1	88,7	37,2	46,1	55,1	64,1	73,1

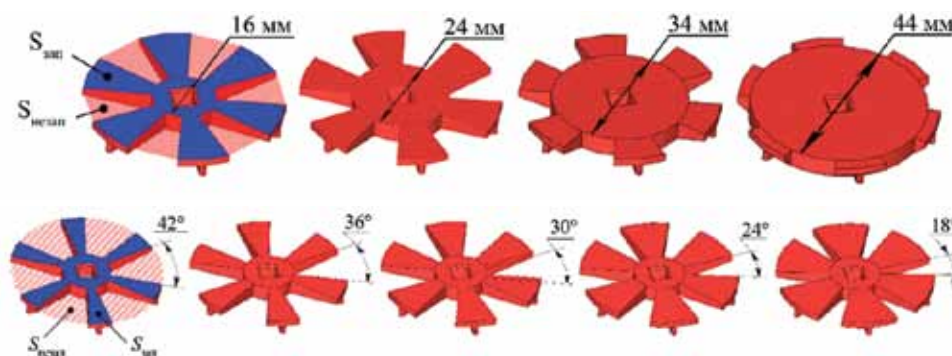


Рис. 3. Формы разбрызгивателей с различными значениями внутреннего диаметра разбрызгивателя (a) и углового шага лопастей (b)

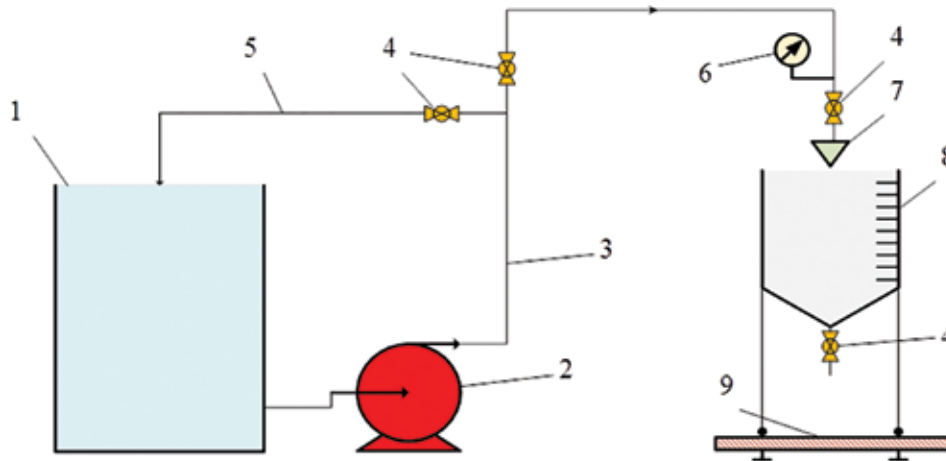


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — емкость для раствора пенообразователя; 2 — насосы; 3 — основной трубопровод; 4 — кран; 5 — обводной трубопровод; 6 — манометр; 7 — сборно-разборный ороситель; 8 — емкость для сбора пены; 9 — электронные весы

ма для определения ее кратности по следующей формуле:

$$K = \frac{V\rho}{m}, \quad (2)$$

где  $V$  — объем емкости для сбора пены (рис. 4),  $m^3$ ;  $\rho$  — плотность раствора пенообразователя,  $кг/м^3$ ;  $m$  — масса пены,  $кг$ .

Экспериментальные исследования кратности и устойчивости пены проводились на установке, схема которой представлена на рис. 4. Жидкая среда, которая подавалась по трубопроводам к оросителю 7 (см. рис. 4) для генерирования пены, представляла собой водный 6%-ый раствор синтетического пожарного пенообразователя ПО-6РЗ. Он относится к пенообразователям общего назначения. Эксперименты проводились при нормальных условиях окружающей среды. Давление перед оросителем составляло 0,1

МПа, что соответствует нормативным требованиям Республики Беларусь [9].

Определение качественных характеристик пены осуществлялось для всех полученных конфигураций сборно-разборного оросителя с разбрызгивателями, представленными на рис. 3, и держателями со значениями  $L = 30, 50, 80, 100$  и  $150$  мм. За результат эксперимента принималось среднearифметическое пяти параллельных измерений. Расхождение между результатами наиболее отличающихся измерений с доверительной вероятностью 0,95 было не более 10 % среднего значения.

Результаты эксперимента при использовании базового оросителя с изменяющимися внутренним диаметром разбрызгивателя  $d$  и угловым шагом лопастей  $\tau$  представлены на рис. 5.

Из данных на рис. 5 следует, что увеличение коэффициента  $S$  как в случае изменения углового шага лопастей  $\tau$ , так и при изменении внутренне-

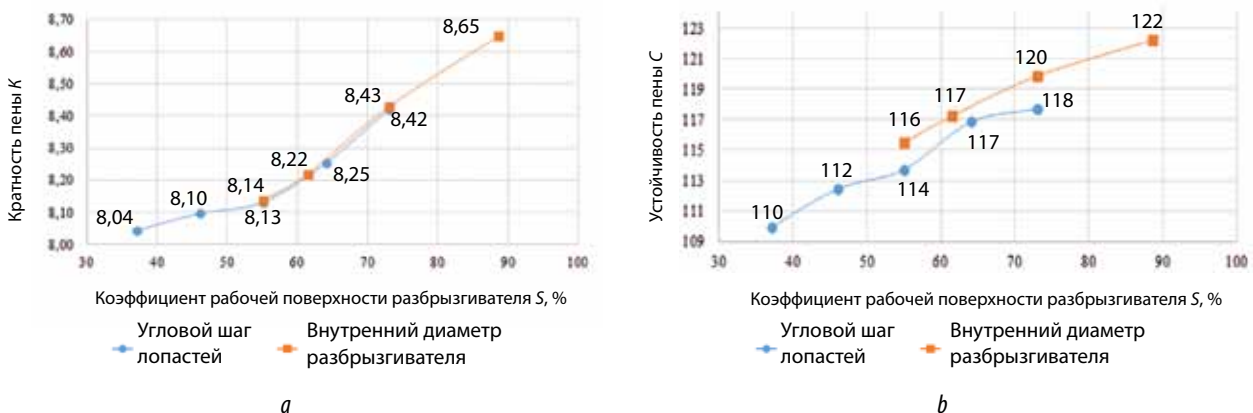


Рис. 5. Зависимость кратности (a) и устойчивости (b) пены от коэффициента рабочей поверхности разбрызгивателя

го диаметра разбрызгивателя  $d$  способствует повышению кратности  $K$  (рис. 5, *a*) и устойчивости  $C$  (рис. 5, *b*) пены. Так, при сравнении разбрызгивателей с наименьшим ( $S = 37,2\%$ ) и наибольшим ( $S = 88,7\%$ ) коэффициентом рабочей поверхности получили, во втором случае кратность выше на  $7,6\%$ , а устойчивость на  $10,9\%$ .

Кроме того, при сравнении разбрызгивателей с изменяющимся значением  $d$ , когда коэффициент рабочей поверхности составляет  $55,1$ ,  $61,5$  и  $71,3\%$ , и с изменяющимся значением  $\tau$ , когда  $S = 55,1$ ,  $64,5$  и  $71,3\%$ , значения кратности и устойчивости практически одинаковы (разница не более  $1,7\%$ ). Данный факт свидетельствует о том, что качественные характеристики генерируемой пены не зависят от способа изменения коэффициента рабочей поверхности разбрызгивателя.

Далее была проведена серия экспериментов для определения того, как повлияет изменение длины держателя  $L$  в диапазоне от  $30$  до  $150$  мм на качественные характеристики пены при различных коэффициентах рабочей поверхности разбрызгивателя  $S$ . Результаты экспериментов (см. рис. 5) показали, что применение разбрызгивателей с достаточно малым значением  $S$  (до  $55\%$ ) нецелесообразно, так как в данном случае большая часть раствора пенообразователя пролетает мимо разбрызгивателя и не разбивается на нем, поэтому значения кратности и устойчивости минимальны. По этой причине в данной серии экспериментов использованы держатели с  $S = 55,1$ ,  $61,5$ ,  $64,1$ ,  $71,3$  и  $88,7\%$ . На рис. 6 результаты исследований представлены в виде зависимостей  $K = f(L, S)$  и  $C = f(L, S)$ .

На рис. 6 видно, что независимо от значения коэффициента  $S$  кратность и устойчивость при увеличении длины держателя с  $30$  до  $50$  мм повышаются. Однако на участке  $L = 50-150$  мм поведение графиков  $K = f(L, S)$  и  $C = f(L, S)$  отличается: при  $S < 64,1\%$  значения  $K$  и  $C$  падают до некоторого значения, после которого остаются постоянными; при  $S = 64,1\%$  значения кратности и устойчивости пены перестают зависеть от  $L$  (разница значений исследуемых параметров не более  $1,7\%$ ), а при  $S > 64,1\%$  как  $K$ , так и  $C$  возрастают с увеличением длины держателя.

В свою очередь, следует отметить, что качество пены существенно зависит от  $L$  и  $S$ , например, значения  $K$  и  $C$  при  $L = 30$  мм и  $S = 61,5\%$  отличаются от  $K$  и  $C$  при  $L = 150$  мм и  $S = 88,7\%$  на  $38,2$  и  $36,6\%$  соответственно.

#### Выводы.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований с пожарным оросителем, изготовленным при помощи аддитивных технологий:

- установлено, что увеличение коэффициента рабочей поверхности разбрызгивателя оросителя в диапазоне значений  $S = 37,2-88,7\%$  при длине держателя  $L$  не более  $45-55$  мм приводит к повышению качественных характеристик пены (кратность  $K$  увеличивается на  $7,6\%$ , устойчивость  $C$  на  $10,9\%$ );

- определено, что кратность и устойчивость пены не зависят от способа изменения коэффициента рабочей поверхности разбрызгивателя (изменение внутреннего диаметра  $d$  либо углового шага лопастей  $\tau$ ), а определяется его фактическим значением;

- установлено, что в диапазоне  $L = 30-50$  мм значения  $K$  и  $C$  возрастают независимо от значения коэффициента рабочей поверхности разбрызгивателя  $S$ ;

- отмечен диапазон значений рабочей поверхности разбрызгивателя  $S = 63-65\%$ , при превышении которого значения кратности и устойчивости пены непрерывно растут во всем диапазоне длин держателя  $L = 30-150$  мм. Кроме того, при использовании разбрызгивателей с  $S$  менее установленного диапазона, качественные характеристики пены повышаются до максимального значения при  $L = 45-55$  мм, а затем постепенно снижаются.

Таким образом, если при выборе оросителя есть ограничения по длине его держателя до  $L = 45-55$  мм, то можно использовать любое необходимое значение  $S$  (из диапазона  $S = 37,2-88,7\%$ ), так как значения качественных характеристик пены будут отличаться не более чем на  $10\%$ . Если же ограничение по длине держателя отсутствует, а потребителю важны высокие значения качественных характеристик пены, то рекомендуется применение разбрызгивателей с  $S > 65\%$ , что обеспечит получение пены с наибольшими значениями кратности и устойчивости.

#### Литература:

1. John, R. Hall. U.S. Experience with sprinklers and other automatic fire extinguishing equipment. USA, J.R. NFPA USA, 2017, 35 p.
2. Technical Bulletin. Aspirated Versus Nonaspirated AFFF [Электронный ресурс] / Ansul

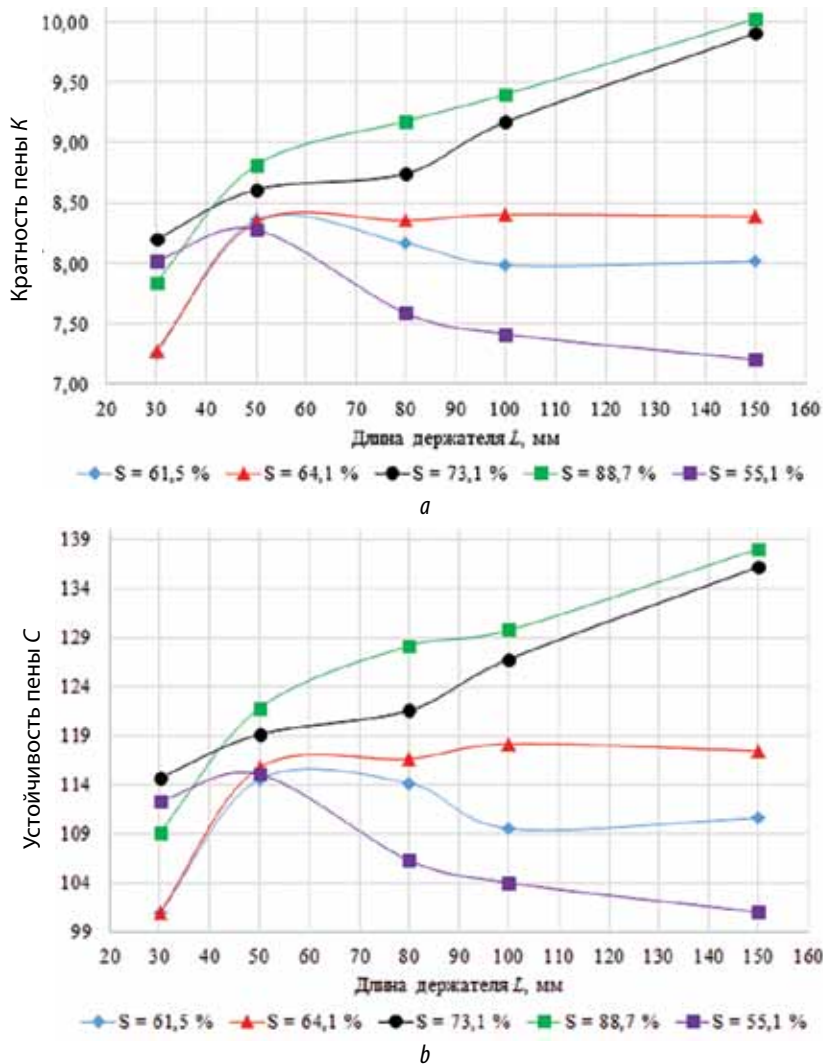


Рис. 6. Зависимость кратности (а) и устойчивости (б) пены от длины держателя при различных коэффициентах рабочей поверхности разбрызгивателя

Inc. — Режим доступа: <https://www.ansul.com/en/us/DocMedia/F-83115.pdf> — Дата доступа: 17.07.2018.

3. Кирюхина, Т. Г. Установки пожаротушения. Основные понятия, проектирование, монтаж, техническая эксплуатация [Текст]: учебное пособие / Т. Г. Кирюхина, Н. В. Смирнов; ред. Т. Г. Кирюхина. — М.: НОУ «ТАКИР», 2006. — 302 с.

4. 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. — № 1(2). — С. 167–177.

5. Тихомиров В. К. Пена. Теория и практика их получения и разрушения. 2-е изд., перераб. — М.: Химия, 1983. — 264 с.

6. Чан, Д. Х. Водопенный насадок с аэрацией огнетушащего вещества на ствол пожарный срк-50: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Чан Дык Хоан. — Минск, 2016. — 174 с.

7. Лихоманов, А. О. Обоснование применения розеточных оросителей, изготавливаемых при помощи аддитивных технологий, в экспериментальных исследованиях качественных характеристик воздушно-механической пены низкой кратности / А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор, А. Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2018. — № 1. — С. 25–39.

8. Сборно-разборный дренчерный ороситель: решение о выдаче патента по заявке № u 20180045 / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор. — заявитель УГЗ МЧС РБ; заявл. 14.02.2018.

9. Технический кодекс установившейся практики. Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.02-190-2010. — Введ. 19.04.2010. — Мн.: РУП «Стройтехнорм», 2010. — 110 с.