

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-3.247>

УДК 614.844.5:614.844.2

КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОРОСИТЕЛЯ, ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПО КРАТНОСТИ ПЕНЫ

Лихоманов А.О.

Цель. Проверка адекватности разработанной экспериментально-статистической математической модели по прогнозированию значения кратности воздушно-механической пены в зависимости от геометрических параметров оросителя и определение характеристик орошения оптимального по кратности пены оросителя.

Методы. Определение характеристик орошения осуществлялось эмпирическим методом – путем проведения лабораторных и комплексных испытаний в реальных условиях.

Результаты. Опыты по определению кратности генерируемой оросителем пены показали достаточную степень сходимости результатов экспериментов с предсказанными при помощи математической модели значениями (отклонение не более 16,1 %). Экспериментально получены значения кратности генерируемой оптимальным оросителем пены в диапазоне от 11,2 до 13,6, что на 60–94 % больше, чем у используемых на данный момент оросителей розеточного типа. Для оптимального по кратности пены оросителя при проведении комплексных испытаний установлены характеристики орошения (защищаемая площадь, интенсивность и равномерность орошения). Определены дальнейшие пути повышения эффективности оросителя при пожаротушении.

Область применения исследований. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании пенных оросителей для автоматических установок пожаротушения с повышенной эффективностью работы.

Ключевые слова: автоматическая установка пожаротушения; ороситель; оптимальная геометрия; кратность пены; защищаемая площадь; интенсивность орошения; равномерность орошения.

(Поступила в редакцию 27 июня 2019 г.)

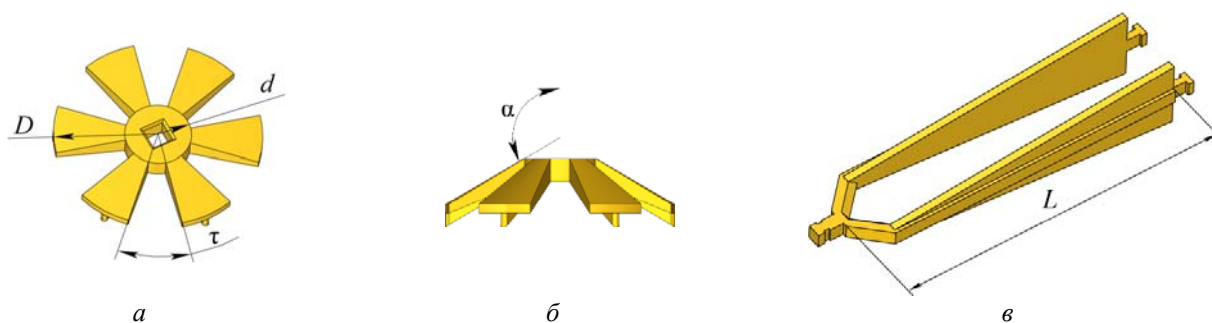
Введение. В настоящее время моделирование процесса генерирования воздушно-механической пены является достаточно сложной задачей: ее решение затруднено наличием множества физико-химических, физико-технических и других процессов, сопровождающих появление пенных пузырьков. В этой связи исследовать факторы, влияющие на процесс получения пены, возможно только эмпирическим методом. В области пожаротушения для пены применяется такая характеристика, как кратность K . Значение кратности показывает, во сколько раз объем пены превышает объем пенообразующего раствора, из которого она получена. Данная характеристика имеет достаточно важное значение, т. к. применение пены с более высокими значениями кратности позволяет сократить время тушения пожара, используя при этом меньшее количество раствора пенообразователя [1, 2].

С целью повышения кратности пены, генерируемой в оросителях розеточного типа для автоматических установок пожаротушения, был проведен ряд экспериментальных исследований [3, 4], в ходе которых определялась зависимость данной характеристики пены от геометрических параметров оросителя, а именно: длины дужек L , внешнего D и внутреннего d диаметра розетки, угла конусности α и углового шага лопастей τ розетки (рис. 1). На основании полученных экспериментальных зависимостей методом полного факторного эксперимента была разработана экспериментально-статистическая математическая модель прогнозирования значений кратности пены K в зависимости от длины дужек L , внешнего диаметра розетки D , угла конусности α и коэффициента рабочей поверхности розетки K_s [5]. Данная модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 K = & 50,73014284 - 1,01230343L + 0,00411574L^2 - 1,11683914K_s + \\
 & + 0,00686677K_s^2 - 0,12923702D + 0,00077359D^2 + 0,06255556\alpha - \\
 & - 0,00087490\alpha^2 + 0,02769106LK_s - 0,00017150LK_s^2 - \\
 & - 0,00011940L^2K_s + 0,00000075L^2K_s^2 + 0,00107070LD - \\
 & - 0,00000674LD^2 + 0,00072965K_sD - 0,00000533K_sD^2.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Коэффициент K_s был введен вместо внутреннего диаметра и углового шага лопастей розетки, т. к. изменение этих двух параметров ведет к изменению ее рабочей поверхности, т. е. той части, которая при генерировании пены взаимодействует с потоком пенообразующего раствора. Правомерность такой замены подтверждена экспериментально – способ изменения площади рабочей поверхности розетки оросителя не оказывает влияния на изменение кратности генерируемой пены, при этом важным является только значение самого коэффициента K_s [3]. Полученная математическая модель была применена для решения задачи оптимизации геометрических параметров оросителя по кратности генерируемой пены в модуле «Профили желательности» программы Statistica [5]. При помощи данного модуля построен оптимальный профиль желательности (уровень желательности $\approx 0,95$), согласно которому генерирование пены со значением кратности 11,7 возможно при следующих значениях геометрических параметров оросителя: $L = 114$ мм; $K_s = 87\%$; $D = 63$ мм; $\alpha = 36^\circ$.

После изготовления оптимального по кратности оросителя решалась задача экспериментальной проверки адекватности разработанной экспериментально-статистической математической модели прогнозирования кратности пены (1).



a, б – розетка оросителя; *в* – дужки оросителя

Рисунок 1. – Исследуемые геометрические параметры оросителя

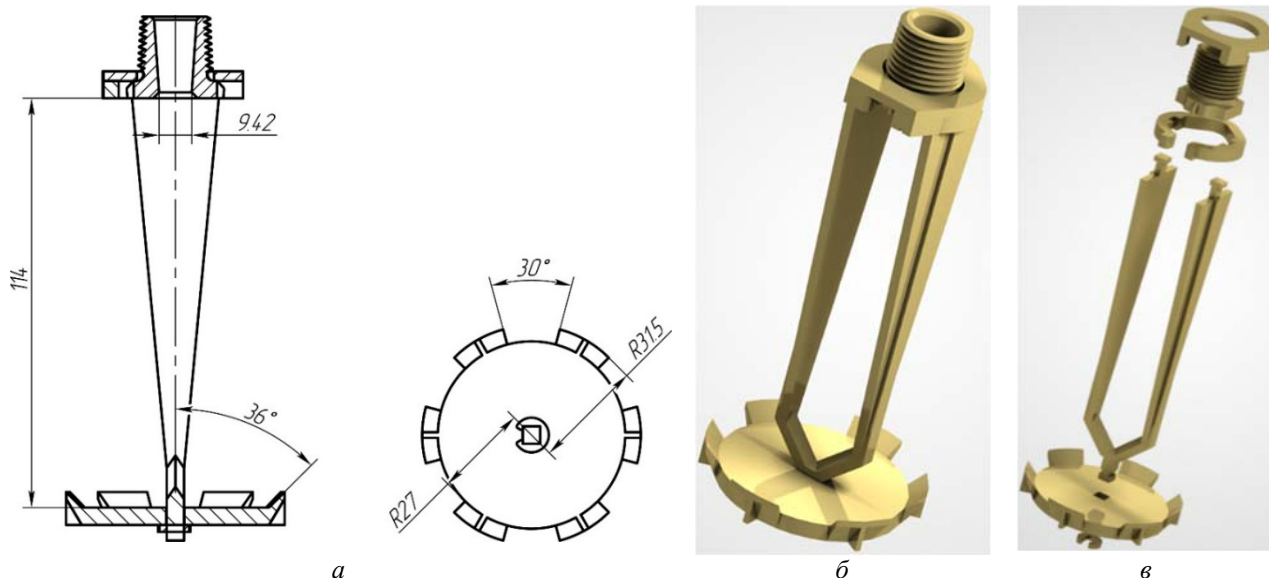
Лабораторные испытания. Определение кратности пены. Для испытаний был использован сборно-разборный ороситель [3] (рис. 2), в котором применялись дужки и розетка с оптимальными по кратности пены геометрическими параметрами и коэффициентом рабочей поверхности розетки (оптимальный ороситель). Элементы оптимального оросителя были изготовлены из PLA-пластика при помощи 3D-печати [3, 6]. Следует отметить, что обоснованность применения пластиковых оросителей для исследования процесса образования пены подтверждена экспериментальным путем [4]. Для этого сравнивалась кратность пены, сгенерированной металлическим оросителем и его точным пластиковым аналогом, напечатанным на 3D-принтере. Разница в полученных значениях находилась в рамках погрешности.

Лабораторные испытания оптимального оросителя проводились на установке, схема которой представлена на рисунке 3. При подаче 6 %-ного водного раствора пенообразователя ПО-6РЗ из емкости 1 при помощи насоса 2 по трубопроводу 3 к оросителю 5 в нем генерировалась пена и попадала в емкость 6. Давление перед оросителем определялось по манометру 4 и устанавливалось на уровне 0,1 МПа. Опыт прекращался при заполнении ем-

кости δ на 100 %. Далее при помощи весов 7 определялась масса пены в емкости δ , после чего рассчитывалась ее кратность по формуле:

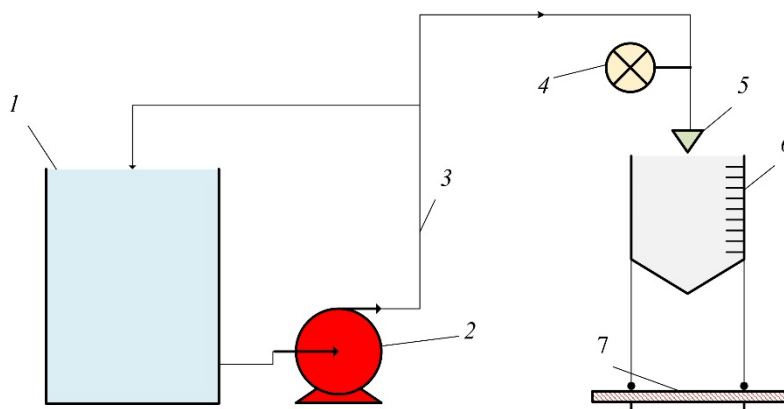
$$K = V\rho / (m_2 - m_1), \quad (2)$$

где V – объем емкости δ ($0,05 \text{ м}^3$); ρ – плотность раствора пенообразователя (1012 кг/м^3); m_1 – масса емкости δ (12 кг); m_2 – масса емкости δ с пеной, кг.



a – чертеж с указанием геометрических размеров элементов оросителя;
 b – внешний вид оросителя в собранном и разобранном виде

Рисунок 2. – Сборно-разборный ороситель



1 – емкость для раствора пенообразователя; 2 – насос; 3 – трубопровод; 4 – манометр; 5 – ороситель;
 δ – мерная емкость; 7 – весы

Рисунок 3. – Схема лабораторной установки

По результатам серии экспериментов было рассчитано среднее значение кратности пены, которое оказалось равным $K_{\text{эксп}} = 11,35$, что на 3,1 % ниже предсказанного значения ($K_{\text{теор}} = 11,71$). Данный результат свидетельствует о достаточно высокой степени соответствия разработанной модели реальной системе. Кроме того, можно сделать вывод, что, с точки зрения повышения кратности пены, целесообразно применять такую конструкции дужек и розетки оросителя, где значения геометрических параметров (длина дужек, внешний диаметр и угол конусности) и коэффициента рабочей поверхности розетки соответствуют полученным оптимальным значениям по модели (1).

Тем не менее огнетушащая эффективность оросителя зависит не только от кратности генерируемой им пены, но и от характеристик орошения (защищаемая площадь, равномерность и интенсивность орошения). Так, например, при использовании оросителя с оп-

тимальной по кратности геометрией возможно как уменьшение защищаемой оросителем площади, так и снижение равномерности и интенсивности ее орошения, что в свою очередь будет негативно сказываться на эффективности пожаротушения. По этой причине для проверки оптимального оросителя по вышеуказанным характеристикам орошения дополнительно проведены комплексные испытания.

Комплексные испытания оросителя. Определение характеристик орошения и кратности пены. Опыты проводились согласно методике, регламентированной государственным стандартом Республики Беларусь¹ в аккредитованной лаборатории испытательного центра Научно-исследовательского института пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Для испытаний была применена аналогичная по своим составным элементам установка (рис. 3), за исключением позиций 6 и 7. Вместо мерной емкости и весов под оросителем 5 устанавливались мерные банки размером $(500 \pm 2) \times (500 \pm 2)$ мм и высотой (200 ± 2) мм, которые расставлялись вплотную друг к другу (рис. 4). При этом ороситель устанавливался на высоте $(2,50 \pm 0,05)$ м от верхнего среза мерных банок (расстояние измерялось от розетки). Ориентация дужек оросителя относительно площадки с мерными банками отмечена на рисунке 4.

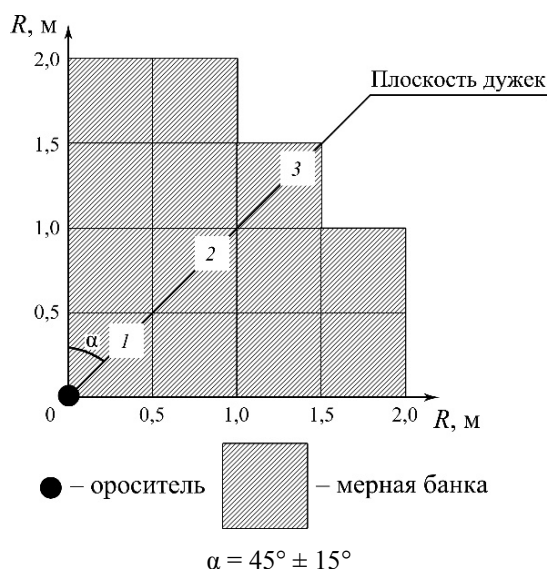


Рисунок 4. – Расположение мерных банок под оросителем (вид сверху)

Для генерирования пены применялся 6 %-ный водный раствор пенообразователя ПО-6РЗ. Его подача осуществлялась при минимальном рабочем давлении перед оросителем $0,1 \pm 0,05$ МПа. Эксперимент заканчивался в момент заполнения пеной одной из мерных банок с одновременной фиксацией времени ее заполнения. Затем определялись необходимые характеристики орошения: защищаемая площадь, равномерность и интенсивность орошения.

Защищаемой площадью S оросителя считается площадь участка плоской поверхности, куда попадает разбрызгиваемое оросителем огнетушащее вещество. Согласно СТБ 11.16.06-2011² для пенных оросителей общего назначения защищаемая площадь должна иметь форму круга, площадь которого не менее 12 м^2 . Под интенсивностью орошения понимается количество (объем) огнетушащего вещества, попадающего на единицу защищаемой площади в единицу времени. При экспериментах определяется интенсивность ороше-

¹ Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 11.16.06-2011/ГОСТ Р 51043-2002. – Введ. 01.01.2012. – Минск: Госстандарт, 2011. – 38 с.

² См. сн. 1.

ния I_i для каждой мерной банки по формуле (3) и средняя интенсивность орошения I_{cp} всех мерных банок по формуле (4):

$$I_i = \frac{V_{p-ра}}{0,25t}; \quad (3)$$

$$I_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \quad (4)$$

где $V_{p-ра}$ – объем жидкой фазы раствора пенообразователя в i -той мерной банке, dm^3 ; t – время от начала подачи раствора пенообразователя до момента заполнения одной из мерных банок, с; n – количество мерных банок.

Интенсивность орошения каждой мерной банки в свою очередь применяется для определения равномерности орошения. Равномерность орошения характеризуется коэффициентом

$$R = \frac{1}{I_{cp}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n I_i \right)^2}{n-1}}. \quad (5)$$

Данный коэффициент определяется по формуле (5) и является показателем, который свидетельствует, насколько различается количество (объем) огнетушащего вещества, попадающего в разные точки защищаемой площади в единицу времени. Коэффициент R изменяется от 0 до 1, при этом чем выше его значение, тем больше отличается количество огнетушащего вещества в различных областях защищаемой площади, т. е. орошение становится все менее равномерным. Согласно СТБ 11.16.06-2011 оросители допускаются к применению в автоматических установках пожаротушения в двух случаях:

- 1) выполняются три условия:
 - коэффициент равномерности орошения $R \leq 0,5$;
 - количество мерных банок с интенсивностью орошения менее 50 % нормативной интенсивности – не более двух;
 - средняя интенсивность орошения – не менее нормативной;
- 2) интенсивность орошения мерных банок – менее либо равна нормативной не более чем у четырех мерных банок.

Результаты проведенных испытаний – комплексных, а также предыдущих лабораторных – сведены в таблицу 1.

Таблица 1. – Результаты испытаний оптимального по кратности пены оросителя

	Защищаемая площадь S , m^2	Средняя интенсивность орошения I_{cp} , $dm^3/(c \cdot m^2)$	Коэффициент равномерности орошения R	Экспериментальная кратность пены $K_{эксп}$	Рассчитанная по модели (1) кратность пены $K_{теор}$
1. Комплексные испытания	12	0,034	0,5	13,6	11,7
2. Лабораторные испытания	–	–	–	11,4	

Следует отметить, что у оптимального оросителя диаметр выходного отверстия составлял $d_{вых} = 9,42$ мм (рис. 2а). Для данного размера выходного отверстия согласно СТБ 11.16.06-2011 средняя интенсивность орошения должна быть не менее $0,040 dm^3/(c \cdot m^2)$ при давлении перед оросителем $0,15$ МПа. Из полученных результатов (табл. 1) видно, что оптимальный ороситель имеет удовлетворительные значения защищаемой площади ($12 m^2$) и коэффициента равномерности орошения ($0,5$). Полученное экспериментальное значение кратности пены при комплексных испытаниях ($K_{эксп} = 13,6$) отличается от предсказанного по математической модели (1) на $16,1$ %. Тем не менее экспериментальное значение крат-

ности пены больше по сравнению с предсказанным по модели, что однозначно является положительным результатом в отношении повышения эффективности пожаротушения. А вот средняя интенсивность орошения оказалась ниже требуемой. Это могло произойти, во-первых, по причине меньшего давления перед оросителем при проведении испытаний (0,1 вместо 0,15 МПа), а во-вторых, из-за несовершенства геометрии розетки в отношении равномерности разбрызгивания огнетушащего вещества на защищаемую поверхность, о чем свидетельствует близкий к критическому коэффициент равномерности орошения ($R = 0,5$).

Заключение. Результаты проведенных комплексных испытаний подтвердили практическую состоятельность предложенной оптимальной по кратности пены геометрии оросителя. В лаборатории и испытательном центре были экспериментально получены значения кратности генерируемой оптимальным оросителем пены в диапазоне от 11,2 до 13,6, что на 60–94 % больше по сравнению с показателями используемых на данный момент оросителей розеточного типа. При проверке характеристик орошения оптимального оросителя установлены удовлетворительные результаты по защищаемой площади и равномерности ее орошения. Исключением стала средняя интенсивность орошения защищаемой площади – установлено отклонение в меньшую сторону от требуемого значения приблизительно на 15 %. Кроме того, коэффициент равномерности орошения хоть и попал в диапазон требуемых значений, однако на уровне верхнего его предела.

С целью повышения средней интенсивности и равномерности орошения защищаемой площади принято решение увеличить количество лопастей оросителя с 6 до 12 и угол конусности розетки с 36 до 45° при неизменных оптимальных значениях остальных основных параметров ($L = 114$ мм; $K_s = 87$ %; $D = 63$ мм). Предположительно, данное изменение геометрии приведет к более равномерному разбрызгиванию пены по защищаемой поверхности, что, в свою очередь, будет способствовать повышению интенсивности орошения каждой ее отдельной точки. Результаты данных исследований будут представлены в дальнейших научных публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rakowska, J. Best practices for selection and application of firefighting foam / J. Rakowska // MATEC Web Conf. – 2018. – Vol. 247. – 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/201824700014.
2. Laundess, A.J. Small-Scale Test Protocol for Firefighting Foams DEF(AUST)5706: Effect of Bubble Size Distribution and Expansion Ratio / A.J. Laundess, M.S. Rayson, B.Z. Dlugogorski, E.M. Kennedy // Fire Technol. – 2011. – Vol. 47, Iss. 1. – P. 149–162. DOI: 10.1007/s10694-009-0136-2.
3. Камлюк, А.Н. Инновационные подходы при оптимизации конструкции пенных пожарных оросителей с помощью аддитивных технологий / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов // Новости науки и технологий. – 2018. – № 3. – С. 53–59.
4. Камлюк, А.Н. Экспериментальное определение рациональных геометрических параметров держателя и разбрызгивателя оросителя по кратности и устойчивости пены / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 60–68. DOI: 10.29235/1561-8358-2019-64-1-60-68.
5. Лихоманов, А.О. Математическая модель прогнозирования кратности пены в зависимости от геометрических параметров розеточных оросителей / А.О. Лихоманов, А.Н. Камлюк // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 2 (41). – С. 25–38.
6. Лихоманов, А.О. Обоснование применения розеточных оросителей, изготавливаемых при помощи аддитивных технологий, в экспериментальных исследованиях качественных характеристик воздушно-механической пены низкой кратности / А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор, А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 25–39. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.25.

Комплексные испытания оросителя, оптимизированного по кратности пены
Comprehensive testing of the sprinkler optimized by the foam expansion rate

Лихоманов Алексей Олегович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС
Беларуси», факультет подготовки научных
кадров, адъюнкт

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск,
ул. Машиностроителей, 25
e-mail: alexlikh20@gmail.com

Alexey O. Likhomanov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Faculty
of Postgraduate Scientific Education, Adjunct

Address: 220118, Belarus, Minsk,
ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: alexlikh20@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-3.247>

COMPREHENSIVE TESTING OF THE SPRINKLER OPTIMIZED BY THE FOAM EXPANSION RATE

Likhomanov A.O.

Purpose. The verification of the experimental-statistical mathematical model for predicting the foam expansion rate depending on the sprinkler geometry and the determination of the spray characteristics of the sprinkler optimized by the foam expansion rate.

Methods. The verification of the developed model and the determination of the sprinkler spray characteristics was conducted using empirical method by carrying out laboratory and complex tests under real conditions.

Findings. Laboratory and complex tests under real conditions showed a sufficient degree of convergence of the results of experiments with the predicted values using a mathematical model (the deviation not more than 16.1 %). The expansion rate values of the foam generated by the optimal sprinkler in the range from 11.2 to 13.6 were obtained. These values are by 60–94 % higher compared to the currently used deflector type sprinklers. During complex test under real conditions the spray characteristics (protected area, spraying intensity and spray uniformity) of the optimal sprinkler were established. Further steps of increasing the foam sprinklers extinguishing efficiency were determined.

Application field of research. The obtained results can be used for designing of foam sprinklers for automatic extinguishing systems with increased extinguishing efficiency.

Keywords: automatic extinguishing system; sprinkler; optimal geometry; foam expansion rate; protected area; spraying intensity; spray uniformity.

(The date of submitting June 27, 2019)

REFERENCES

1. Rakowska J. Best practices for selection and application of firefighting foam. *MATEC Web Conf.*, 2018. Vol. 247. 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/201824700014.
2. Laundess A.J., Rayson M.S., Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M. Small-Scale Test Protocol for Fire-fighting Foams DEF(AUST)5706: Effect of Bubble Size Distribution and Expansion Ratio. *Fire Technology*, 2011. Vol. 47, No. 1. Pp. 149–162. DOI: 10.1007/s10694-009-0136-2.
3. Kamluk A.N., Likhomanov A.O. Innovatsionnye podkhody pri optimizatsii konstruksii pennykh pozharnykh orositeley s pomoshch'yu additivnykh tekhnologiy [Innovative way to optimize the design of foam fire sprinklers with the help of additive technologies]. *News of Science and Technologies*, 2018. Vol. 46, No. 3. Pp. 53–59. (rus) [http://belisa.org.by/pdf/2018/NNT3/art8_NNT_3\(46\)_2018.pdf](http://belisa.org.by/pdf/2018/NNT3/art8_NNT_3(46)_2018.pdf).
4. Kamluk A.N., Likhomanov A.O. Eksperimental'noe opredelenie ratsional'nykh geometricheskikh parametrov derzhatelya i razbryzgivatelya orositelya po kratnosti i ustoychivosti peny [Experimental determination of the rational geometrical parameters of the sprinkler frame arms and deflector on the expansion rate and stability of foam]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019. Vol. 64, No. 1. Pp. 60–68. (rus) DOI: 10.29235/1561-8358-2019-64-1-60-68.
5. Likhomanov A.O., Kamluk A.N. Matematicheskaya model' prognozirovaniya kratnosti peny v zavisimosti ot geometricheskikh parametrov rozetochnykh orositeley [Mathematical model for predicting foam expansion rate depending on the geometrical parameters of deflector type sprinkler]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2019. Vol. 41, No. 2. Pp. 25–38. (rus)
6. Likhomanov A.O., Govor E.G., Kamluk A.N. Obosnovanie primeneniya rozetochnykh orositeley, izgotavlivaemykh pri pomoshchi additivnykh tekhnologiy, v eksperimental'nykh issledovaniyakh kachestvennykh kharakteristik vozdushno-mekhanicheskoy peny nizkoy kratnosti [The substantiation of the application of deflector sprinklers manufactured by additive technologies in experimental studies of qualitative characteristics of the low-expansion air-mechanical foam]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 1. Pp. 25–39. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.25.