

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРАТНОСТИ ОГНЕТУШАЩЕЙ ПЕНЫ, ПОЛУЧАЕМОЙ В УСТРОЙСТВАХ С СЕТКАМИ

Камлюк А.Н., Лихоманов А.О., Гараев Ю.В., Вашкевич Д.А.

Цель. На основе результатов экспериментальных исследований разработать математическую модель для прогнозирования кратности пены с учетом основных параметров процесса пенообразования на сетках пеногенерирующих устройств.

Методы. Общая методология работы предусматривала использование теоретических (анализ, синтез, сравнение) и экспериментальных методов исследования. Кратность пены определялась экспериментальным путем по разработанной методике. Обработка экспериментальных данных и создание математической модели включали использование статистического регрессионного анализа.

Результаты. В результате исследований получены экспериментальные данные зависимости кратности пены от ряда параметров процесса пенообразования на сетках пеногенерирующих устройств (размера ячейки сетки, расстояния от выходного отверстия насадка до сетки, диаметра выходного отверстия насадка, скорости подачи пенообразующего раствора и его свойств). В частности, для учета размера ячейки сетки использован обобщенный параметр K_m , отражающий долю заполненной проволокой части от всей площади поверхности сетки. Скорость пенообразующего раствора и его свойства учтены с помощью числа капиллярности Ca . На основе анализа и обобщения полученных данных разработана математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, отражающая перечисленные параметры пенообразования на сетках. Прогнозные значения по разработанной модели хорошо согласуются с экспериментальными значениями (анализ остатков подтвердил адекватность модели). Средняя погрешность расчета кратности пены составляет менее 10 %.

Область применения исследований. Проектирование и эксплуатация пеногенерирующих устройств с сетками. Предложенная модель позволяет подбирать необходимую конфигурацию параметров пеногенерирующего устройства с учетом применяемого пенообразователя и условий подачи пенообразующего раствора для получения наиболее эффективной с точки зрения пожаротушения пены.

Ключевые слова: пеногенерирующее устройство, сетка, кратность пены, математическая модель.

(Поступила в редакцию 12 января 2026 г.)

Введение

Для ликвидации пожаров твердых и жидких веществ, не вступающих во взаимодействие с водой при тушении, применяется воздушно-механическая пена низкой кратности от 3 до 20 (определяется как отношение объема пены к объему раствора пенообразователя, из которого она получена) [1]. При этом чем выше кратность пены (имеется в виду внутри диапазона от 3 до 20), тем больше ее огнетушащая эффективность [1–4]. На практике пену низкой кратности (далее – пена) получают с помощью оросителей для автоматических установок пожаротушения, на сетках в насадках для пожарных стволов и в установках генерирования компрессионной пены. В последнем случае для получения пены имеется возможность регулирования подачи воды и пенообразователя (а значит, и процентного состава пенообразующего раствора), а также подачи воздуха. Все перечисленные процессы контролируются в режиме реального времени (в момент пожаротушения) с помощью системы управления установки генерирования компрессионной пены, а значит, контролю подлежит и численное значение кратности получаемой пены. В то же время на оросителях и сетках в насадках пожарных стволов нет возможности регулировать подачу жидкой фазы и воздуха. В связи с этим можно разделить установки и устройства для получения пены по возможности регулирования ее кратности на две категории (рис. 1).

В случае когда есть возможность регулирования кратности пены, добиваться высокой огнетушащей эффективности можно, например, за счет регулирования расхода воздуха прямо на месте ликвидации чрезвычайной ситуации. В другом случае (нерегулируемая кратность пены) важно заблаговременно позаботиться о результатах тушения пожара за счет рационального подбора параметров устройств и средств, применяемых для тушения. Здесь на

первое место необходимо поставить прогноз численного значения кратности пены, т.е. математическую модель, по которой можно оценить кратность пены с учетом геометрических особенностей устройства пожаротушения, гидродинамических параметров подачи раствора пенообразователя, включая физико-механические свойства последнего.

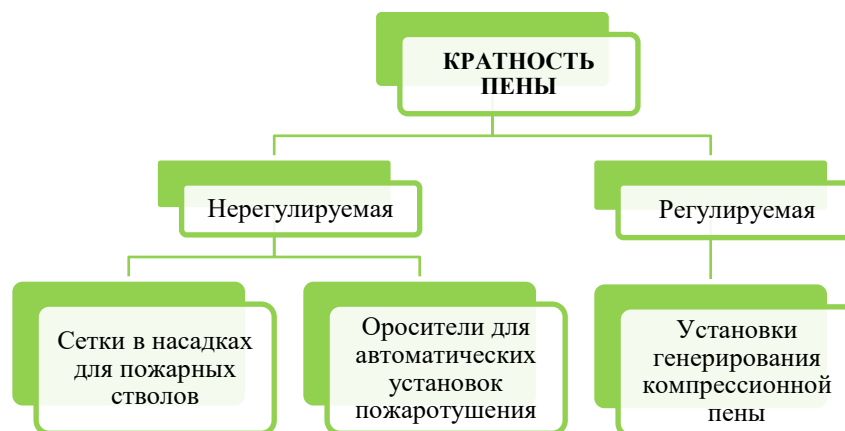


Рисунок 1. – Классификация установок и устройств для получения пены в зависимости от возможности регулирования ее кратности

Так, с целью прогнозирования значения кратности пены, генерируемой оросителями для автоматических установок пожаротушения, в работе [5] исследована зависимость данной характеристики от геометрических параметров розеточного оросителя, а также параметров, влияющих на процесс образования пены (скорости подачи и свойств раствора пенообразователя). В исследовании использовались оросители с розетками внешнего диаметра от 20 до 400 мм. В итоге предложена математическая модель для прогнозирования кратности пены:

$$K = 0,026\gamma_{e,r}K_s^{0,5}\left(\frac{L_f}{D}\right)^g\left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^{-0,05}We^{0,32}, \quad g = \begin{cases} 0,1 & \text{при } L_f / D \leq 3,0; \\ -0,03 & \text{при } 3,0 < L_f / D \leq 7,5, \end{cases} \quad (1)$$

где $\gamma_{e,r}$ – коэффициент для учета свойств пенообразователя;

K_s – коэффициент рабочей поверхности розетки;

L_f – длина дужек;

D – внешний диаметр розетки;

D_{\max} – наибольший диаметр розетки;

We – число Вебера.

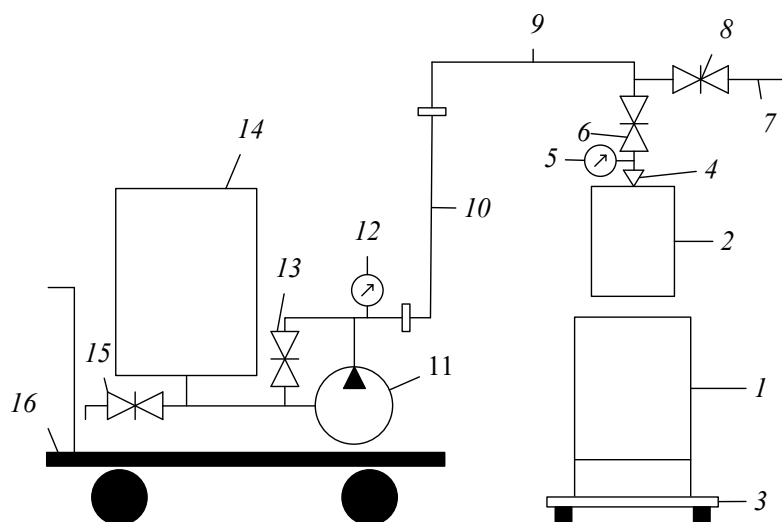
Данная модель построена на основе результатов анализа большого массива экспериментальных данных, а значения степеней при безразмерных членах уравнения определены с помощью метода логарифмирования. Таким образом, она учитывает не только соотношение геометрических параметров элементов оросителя, но и гидродинамику процесса генерирования пены, а также свойства применяемого пенообразующего раствора.

В данной работе описаны результаты исследований, основной целью которых являлось построение аналогичной математической модели для прогнозирования кратности пены, получаемой при использовании пеногенерирующих устройств с сетками, например, пожарных стволов с пенными насадками.

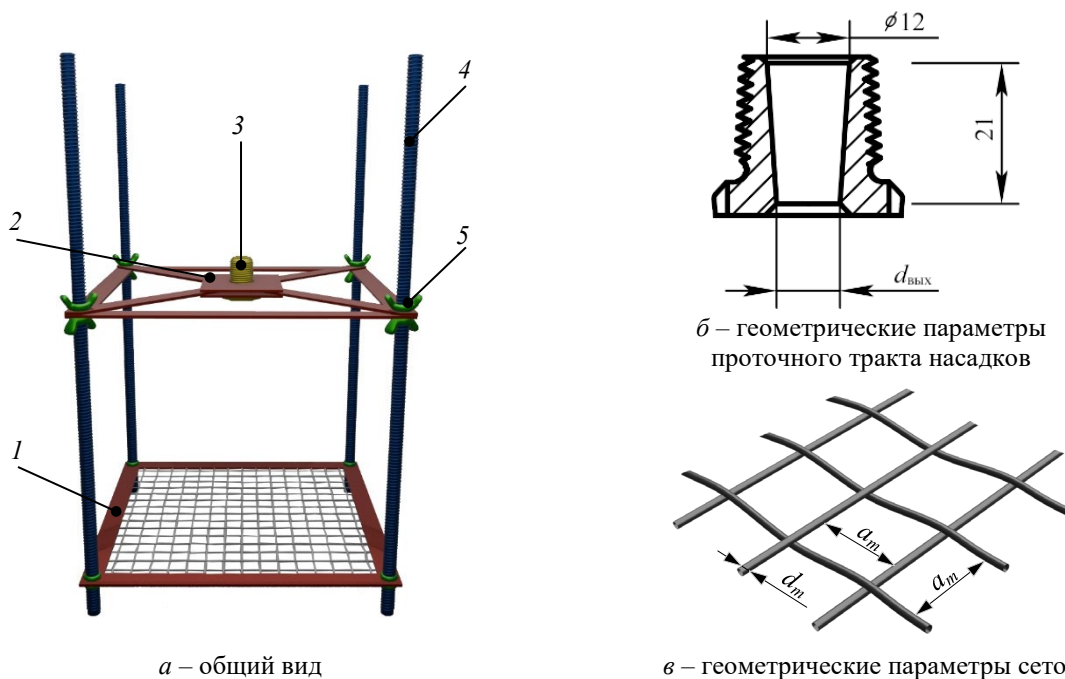
Основная часть

Экспериментальное определение кратности пены. Экспериментальное определение зависимости кратности пены от геометрических параметров сетки, гидродинамических параметров и свойств пенообразующего раствора выполнялось на установке, схема которой представлена на рисунке 2.

Устройство для образования пены на сетке (рис. 2) состоит из четырех металлических вертикальных ребер с резьбой, на которых расположены фиксаторы, позволяющие регулировать расстояние от выходного отверстия насадка для подачи пенообразующего состава до сетки (рис. 3а). В нижней части устройства крепится сетка, а в верхней части находится держатель для крепления устройства на трубопроводе экспериментальной установки, благодаря которому оно может быть оперативно смонтировано либо демонтировано.



1 – мерная емкость; 2 – устройство для образования пены на сетке; 3 – весы; 4 – насадок; 5, 12 – манометр; 6, 8, 13, 15 – запорный вентиль; 7, 9 – трубопровод; 10 – напорный рукав; 11 – насос; 14 – емкость с рабочим раствором пенообразователя; 16 – каркас установки
Рисунок 2. – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процесса образования пены на сетках пеногенерирующих устройств



а – общий вид
 б – геометрические параметры проточного тракта насадков
 в – геометрические параметры сеток
 1 – рамка с сеткой; 2 – рамка с держателем; 3 – насадок; 4 – металлические вертикальные ребра с резьбой; 5 – фиксатор; $d_{\text{вых}}$ – диаметр входного и выходного отверстий насадка; a – длина стороны ячейки сетки в свету, d_m – диаметр проволоки сетки

Рисунок 3. – Устройство к экспериментальной установке для исследования процесса образования пены на сетках пеногенерирующих устройств

При проведении эксперимента для генерирования пены применялись все возможные комбинации следующих параметров: размер ячеек сетки 0,5×0,5; 0,7×0,7; 1,0×1,0; 2,0×2,0 и 3,2×3,2 мм; диаметр выходного отверстия насадка для подачи пенообразующего раствора: 4, 6, 8 и 11 мм (форма проточного тракта насадков представлена на рисунке 3б); расстояние от выходного отверстия насадка до сетки 50, 100, 200, 300 и 400 мм. В качестве пенообразователей для приготовления раствора использовались пенообразователи целевого и общего назначения по СТБ 2459¹ марок ПО-РЗФ (6 %) и ПО-6РТС (6 %) соответственно. Следует

¹ Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Взамен СТБ ГОСТ Р 50588-99; введ. 12.08.2016. – Мн.: Госстандарт, 2016. – III, 42 с.

подчеркнуть, что в исследованиях для получения пены приготавливался именно рабочий раствор пенообразователя, т.е. водный раствор с рекомендуемой производителем концентрацией пенообразователя в нем (указана в скобках в названии марки пенообразователя). Как правило, при отклонении концентрации пенообразователя от рекомендуемой производителем наблюдается существенное ухудшение пенообразования, в том числе кратности пены. По этой причине растворы пенообразователей с иной концентрацией активного компонента не рассматривались в данной работе. Методика определения кратности пены заключалась в следующем. При использовании экспериментальной установки (рис. 2) рабочий раствор пенообразователя подавался из емкости 14 с помощью насоса 11 по напорному рукаву 10 и трубопроводу 9 к запорным вентилям 6 и 8, которые находились в закрытом положении. Далее с целью настройки равномерной работы установки и создания необходимого рабочего давления открывался запорный вентиль 8 и раствор подавался через трубопровод 7 в дренаж не менее 20 с. Одновременно с помощью вентиля 13 по показаниям манометра 12 устанавливалось давление 2,8 атм. После настройки установки вентиль 8 закрывался, а вентиль 6 открывался, тем самым раствор пенообразователя подавался через насадку 4 к устройству 2, с помощью которого пена генерировалась и попадала в мерную емкость 1. Опыт прекращался при заполнении мерной емкости. Затем кратность пены определялась по формуле:

$$K = \frac{V_e \cdot \rho_{p-pa}}{m_2 - m_1}, \quad (3)$$

где V_e – объем мерной емкости, м³;

m_1 и m_2 – масса мерной емкости, пустой и заполненной пеной, кг;

ρ_{p-pa} – плотность раствора пенообразователя, кг/м³.

Эксперимент проводился сериями по пять опытов. Все измерения осуществлялись с помощью поверенного в установленном порядке оборудования.

Для анализа и обобщения полученных экспериментальных данных, а также дальнейшей разработки математической модели в безразмерном виде ряд исследуемых параметров были модифицированы. В частности, для учета различного размера ячейки сетки (рис. 3в) введен новый безразмерный параметр – коэффициент рабочей поверхности сетки K_m , определяемый по следующей формуле:

$$K_m = a_m^2 / (a_m + d_m)^2, \quad (4)$$

где a_m – длина стороны ячейки сетки в свету, мм;

d_m – диаметр проволоки сетки, мм.

Здесь следует пояснить, что согласно ГОСТ 2715² стандартные сетки имеют различие не только по размеру ячейки, но и по диаметру применяемого прутка проволоки. По этой причине по аналогии с исследованием процесса образования пены в розеточных оросителях для автоматических установок пожаротушения [1] принято решение ввести параметр, который показывает долю заполненной проволокой части от всей площади поверхности сетки. Связано это с тем, что при изменении данного коэффициента в большую либо меньшую сторону соответственно меняется и количество пенообразующего раствора, которое ударяется о сетку в процессе его подачи через насадку, что, в свою очередь, может существенно влиять на кратность получаемой пены. Параметры использованных при эксперименте сеток приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры сеток для экспериментальных исследований

Длина стороны ячейки a_m , мм	Диаметр проволоки d_m , мм	Коэффициент рабочей поверхности сетки K_m
0,5	0,20	0,51
0,7	0,28	0,51
1,0	0,25	0,64
2,0	0,40	0,69
3,2	0,50	0,75

Для учета изменения скорости потока пенообразующего раствора на выходе из насадка, а также свойств применяемого пенообразователя в модели принято использовать

² Сетки металлические проволочные. Типы, основные параметры и размеры: ГОСТ 2715-75. – Взамен ГОСТ 2715-44; введ. 01.01.1977. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 15 с.

гидродинамический критерий подобия – число капиллярности Ca [6; 7], определяемое по формуле:

$$Ca = \eta v / \sigma, \quad (5)$$

где η – динамический коэффициент вязкости жидкости;
 v – средняя скорость потока жидкости;
 σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Средняя скорость потока жидкости на выходе из насадка определялась исходя из расхода раствора пенообразователя через насадок при давлении на насосе 2,8 атм (выбор давления связан с техническими ограничениями насосной установки). Для этого емкость 14 (рис. 2) заполнялась рабочим раствором пенообразователя. На емкости предварительно были проставлены верхняя и нижняя метки объема жидкости 30 л таким образом, чтобы верхняя граница была ниже уровня жидкости при заполненной емкости, а нижняя – выше дна емкости. Производился пуск установки и подача раствора пенообразователя через насадок 4 в мерную емкость 1 (без установки устройства для образования пены на сетке). В процессе с помощью секундомера определялось время прохождения уровня жидкости в емкости 14 от верхней метки до нижней, а также фиксировалось давление перед насадком по манометру 5. Далее скорость потока жидкости из выходного отверстия насадка определялась по формуле:

$$v = \frac{4V_{\text{уч}}}{\pi d_{\text{вых}}^2 t}, \quad (6)$$

где $V_{\text{уч}}$ – объем жидкости между верхней и нижней метками в емкости 14 (рис. 2);
 t – время прохождения уровня жидкости от верхней метки до нижней в емкости 14.

Экспериментальные значения расхода, средней скорости и давления потока жидкости перед насадком представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Экспериментальные значения расхода, средней скорости и давления потока жидкости перед насадком

Диаметр выходного отверстия насадка $d_{\text{вых}}$, мм	Расход, (м ³ /с) · 10 ⁻⁴	Средняя скорость v , м/с	Давление перед насадком, атм
4	2,65	21,1	2,5
6	5,32	18,8	2,3
8	8,49	16,9	2,0
11	14,16	14,9	1,2

Влияние на кратность пены расстояния от выходного отверстия насадка до сетки принято учитывать с помощью безразмерного члена уравнения (L/L_{max}), отражающего отношение фактической длины пути струи пенообразующего раствора до соударения с сеткой к максимальной, которая принята равной 400 мм в рамках текущих исследований.

Результаты проведенного эксперимента по определению кратности пены с использованием сеток пеногенерирующих устройств представлены на рисунке 4. Для удобства визуального анализа результаты представлены в виде 3D-поверхности, построенной по полученным экспериментальным значениям кратности при различных комбинациях значений числа капиллярности Ca , относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки (L/L_{max}) и коэффициента рабочей поверхности розетки K_m .

Здесь видно, что при значениях K_m от 0,51 до 0,64 график зависимости кратности пены от числа капиллярности и относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки имеет схожий вид, при этом наибольшие значения кратности от 18 до 23 находятся в области значений Ca от 0,70 до 0,85 и (L/L_{max}) от 0,7 до 1,0 соответственно. Вместе с тем пиковое значение кратности пены наблюдается при максимальных значениях вышеуказанных параметров – $Ca = 0,85$ и ($L/L_{\text{max}} = 1$). Однако при $K_m = 0,51$ наибольшее значение кратности пены 22,69, в то время как при $K_m = 0,64$ оно уже на 13 % ниже и составляет 19,82. В то же время следует отметить, что при $K_m = 0,64$ область 3D-поверхности в диапазоне значений Ca от 0,5 до 0,6 и (L/L_{max}) от 0,25 до 1,00 находится выше по сравнению с графиком при $K_m = 0,51$. Таким образом, при увеличении коэффициента рабочей поверхности сетки 3D-поверхность становится более плоской, с меньшим размахом R (разница между наибольшим и наименьшим значением кратности пены), а именно: $R = 11,48$ при $K_m = 0,51$ и $R = 7,64$ при $K_m = 0,64$.

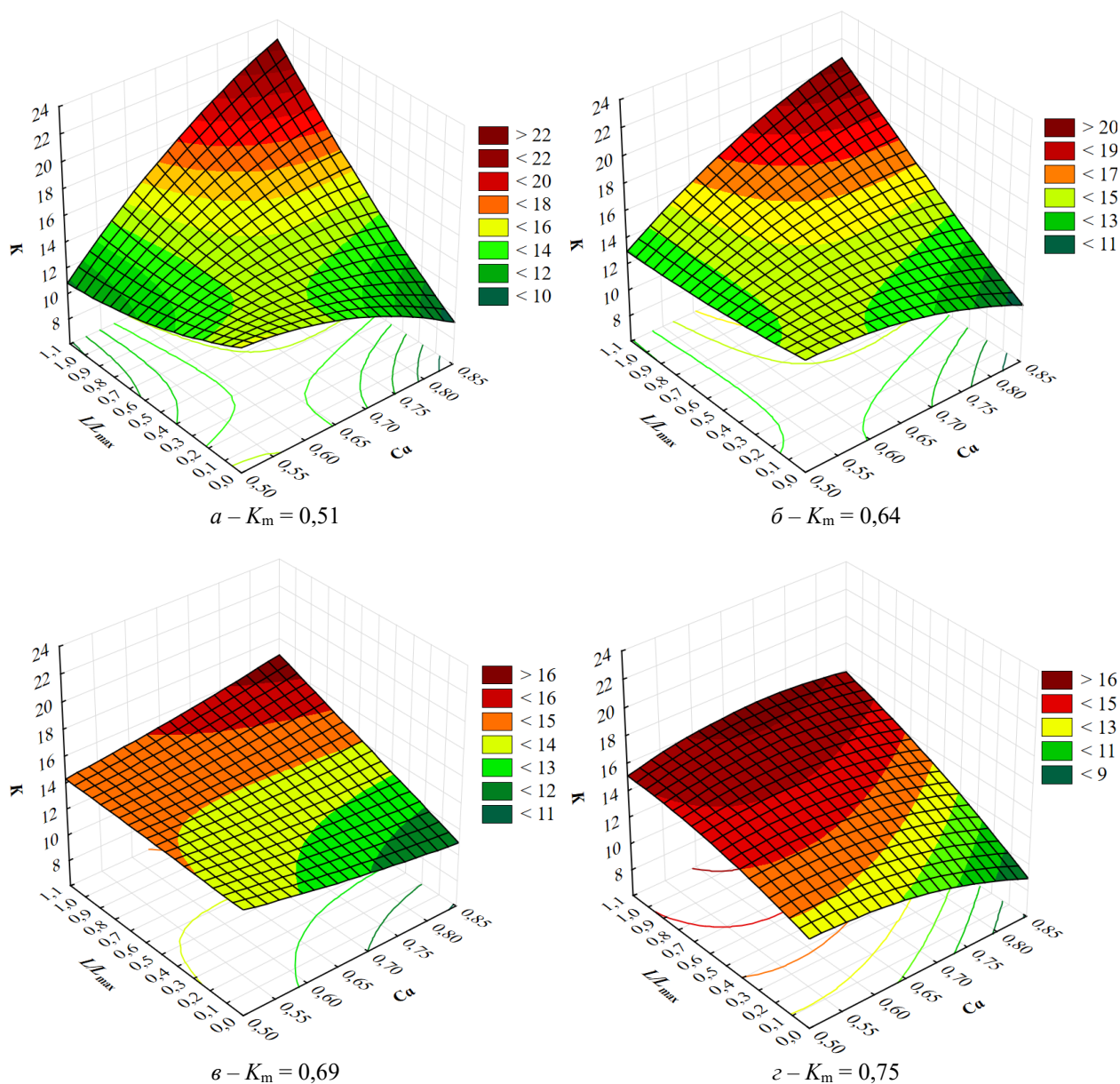


Рисунок 4. – Зависимость кратности пены от числа капиллярности Ca и относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки (L / L_{max}) при различных значениях коэффициента рабочей поверхности сетки K_m

При дальнейшем увеличении коэффициента K_m от 0,64 до 0,75, как видно на рисунках 4в и 4г, происходит явное смещение области наибольших значений кратности пены в диапазон более низких значений числа капиллярности Ca и (L/L_{max}). При этом максимальные значения кратности пены постепенно снижаются по сравнению с ранее рассмотренным диапазоном K_m от 0,51 до 0,64. Так, при $K_m = 0,69$ наибольшая кратность пены 16,7, а при $K_m = 0,75$ – 16,2. Кроме того, здесь также наблюдается уменьшение размаха значений кратности пены с ростом коэффициента рабочей поверхности сетки (R составляет 6,23 и 5,69 при K_m равном 0,69 и 0,75 соответственно), т.е. с увеличением K_m влияние числа капиллярности Ca и относительного расстояния (L/L_{max}) на изменение кратности пены становится менее существенным.

С целью возможности прогнозирования значения кратности пены в зависимости от конфигурации параметров процесса получения пены на сетках пеногенерирующих устройств необходимо построение математической модели на основе полученных экспериментальных данных с последующей проверкой ее точности и адекватности.

Разработка математической модели. Принимая во внимание ранее обозначенные основные исследуемые параметры процесса образования пены на сетках, обобщенный вид

математической модели для прогнозирования кратности огнетушащей пены по аналогии с моделью (1) [5] может быть представлен следующим образом:

$$K = Ca^a K_m^b (L/L_{\max})^c, \quad (7)$$

где a, b, c – значения степеней при безразмерных членах уравнения.

Поиск значений степеней a, b и c в уравнении (7) выполнялся с помощью метода логарифмирования и сопоставления с полученными экспериментальными зависимостями кратности пены от включенных в данное уравнение переменных величин. Значения степеней приняты равными угловым коэффициентам прямых линий регрессии для соответствующих зависимостей в логарифмическом масштабе. Для зависимостей $\ln(K) = f(Ca)$, $\ln(K) = f(K_m)$ и $\ln(K) = f(L/L_{\max})$ построены прямые линии регрессии с использованием метода наименьших квадратов (рис. 5) и установлены их угловые коэффициенты: $a = 0,12$; $b = -0,11$ и $c = 0,09$ соответственно.

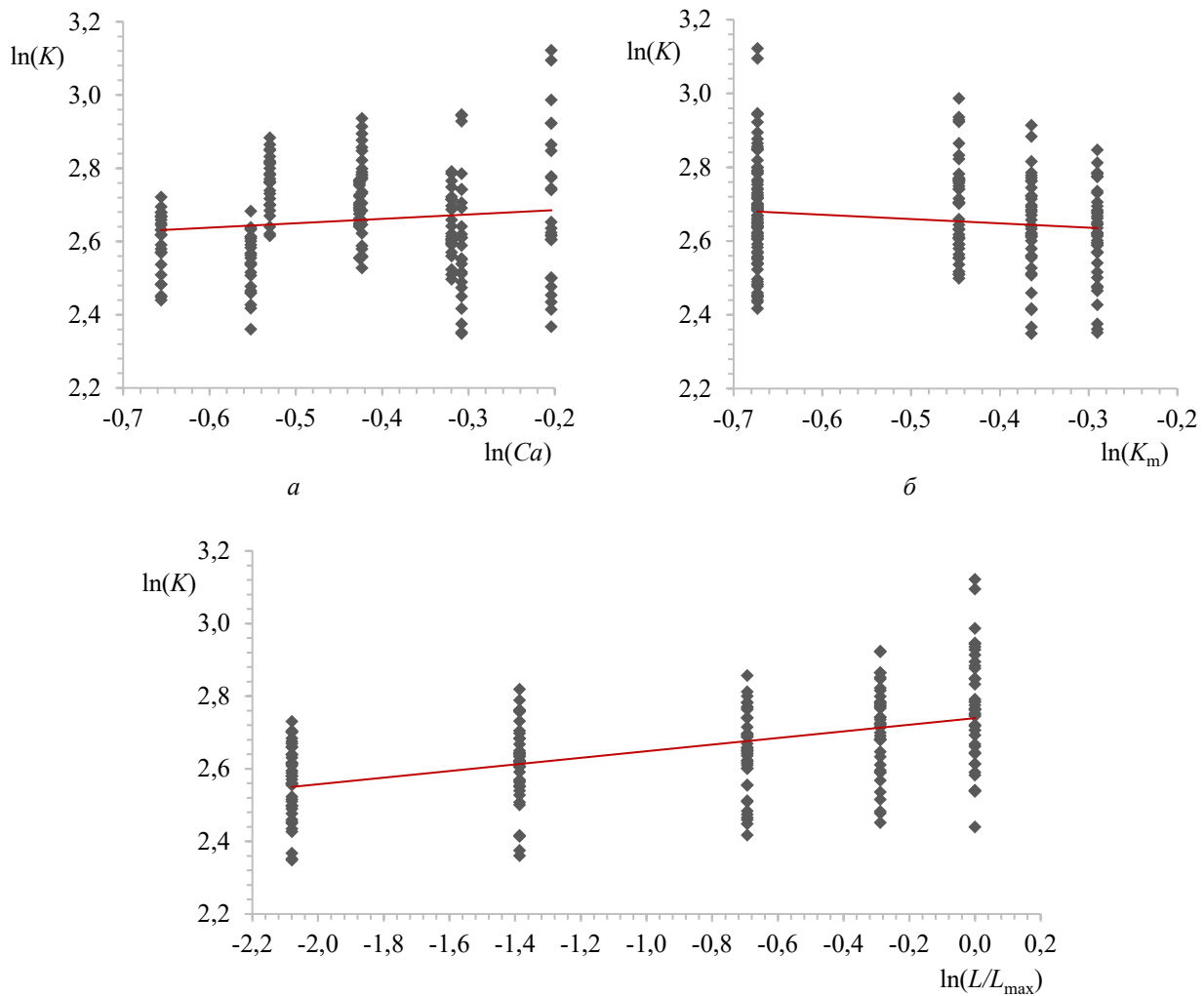


Рисунок 5. – Зависимость логарифма кратности пены K от логарифма числа капиллярности Ca (а), логарифма коэффициента рабочей поверхности сетки K_m (б) и логарифма относительного расстояния от выходного отверстия насадка до сетки L/L_{\max} (в)

Область адекватности модели ограничивается следующими диапазонами значений входящих в нее переменных величин: $Ca = 0,519-0,815$; $K_m = 0,51-0,75$, $L = 50-400$ мм.

Для подтверждения адекватности разработанной модели проведен анализ остатков (разность между экспериментальными значениями зависимой переменной и их прогнозными значениями по модели). Остатки – случайные величины и не должны зависеть от прогнозных по моделям значений зависимой переменной. Из представленных на рисунке 6 данных

видно, что систематической зависимости значений остатков от прогнозных значений зависимой переменной не наблюдается (коэффициент корреляции $r = 0,07$), следовательно, по данному критерию модель (8) можно считать адекватной.

Еще одним критерием адекватности моделей является нормальность распределения величин остатков. С целью оценки нормальности их распределения проведена процедура вычисления значения критерия согласия и проверки гипотезы о соответствии распределения остатков нормальному закону. Для этого было использовано программное обеспечение STATISTICA, а именно модуль «Подгонка распределения» [8]. С помощью данного модуля построена гистограмма распределения остатков, которая представлена на рисунке 7. Здесь указаны значения критерия согласия χ^2 и уровня значимости критерия p . В данном случае нулевая гипотеза означает, что распределение остатков соответствует нормальному закону. Так как значения уровня значимости критерия p значительно больше $0,05$, вероятность ошибиться, отбросив нулевую гипотезу, велика, поэтому принята гипотеза о нормальности рассматриваемого распределения остатков.

Таким образом, результаты проведенного анализа остатков подтверждают адекватность построенной модели для прогнозирования значений зависимой переменной (кратности пены).

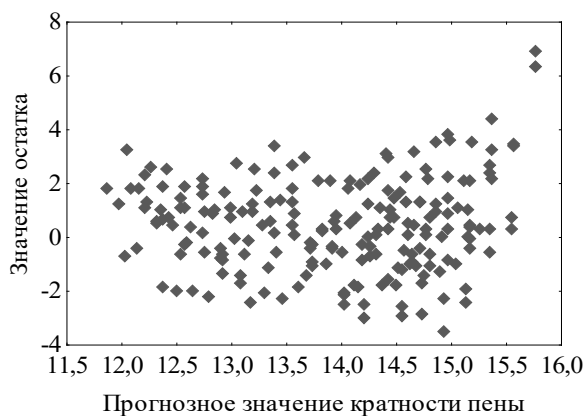


Рисунок 7. – График рассеяния остатков в зависимости от прогнозных значений зависимой переменной

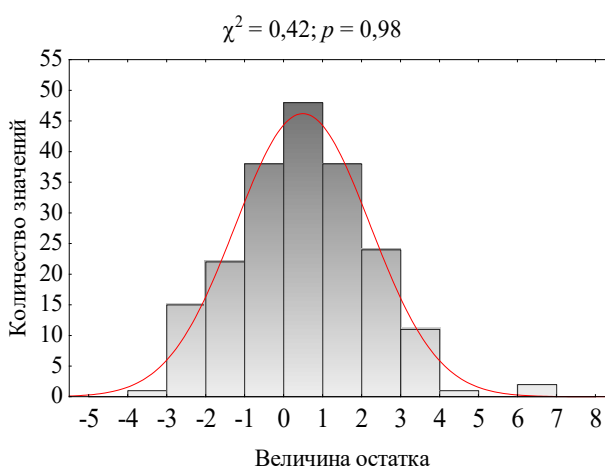


Рисунок 8. – Гистограмма распределения остатков

Заключение

В результате проведенных исследований получены экспериментальные данные о зависимости кратности пены от ряда параметров процесса пенообразования на сетках пеногенирующих устройств, например, пожарных стволов с пенными насадками. На основе анализа и обобщения полученных результатов разработана математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, учитывающая основные регулируемые параметры (размер ячейки сетки, расстояние от выходного отверстия насадка до сетки, диаметр выходного отверстия насадка), а также гидродинамику процесса подачи пенообразующего раствора и его свойства. В частности, для учета размера ячейки сетки использован обобщенный параметр K_m , который показывает долю заполненной проволокой части от всей площади поверхности сетки. Скорость пенообразующего раствора и его свойства в модели учитываются с помощью числа капиллярности Ca . Прогнозные значения по разработанной модели хорошо согласуются с экспериментально измеренными значениями. Средняя погрешность расчета кратности пены составляет менее 10 %.

Предложенная модель позволит подбирать необходимую конфигурацию параметров пеногенирующего устройства с учетом применяемого пенообразователя и условий подачи пенообразующего раствора для получения наиболее эффективной с точки зрения пожаротушения пены.

В рамках дальнейших исследований планируется валидация и при необходимости уточнение разработанной модели с использованием других марок пенообразователей различного назначения, а также расширение ее граничных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2023. – 244 с. – ISBN: 978-985-590-186-1.
2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Мн.: УГЗ, 2019. – 224 с. – ISBN: 978-985-590-050-5.
3. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с возможностью изменения расхода огнетушащего средства: от моделирования до огневых испытаний: монография / А.Н. Камлюк, А.А. Морозов, В.В. Пармон. – Мн.: УГЗ, 2024. – 189 с. – ISBN: 978-985-590-220-2.
4. Корольченко, Д.А. Тушение пламени гидрофобных материалов водными растворами смачивателей / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 3. – С. 61–68. – EDN: TUBQAX.
5. Kamluk, A.N. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov, E.G. Govor, A.V. Grachulin // Magazine of Civil Engineering. – 2025. – Vol. 17, No. 07. – Article 13102. – 11 p. – DOI: 10.34910/MCE.131.2.
6. Камлюк, А.Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. – EDN: SQVQWY.
7. Камлюк, А.Н. Количественное описание механизмов образования воздушно-механической пены низкой кратности для нужд пожаротушения / А.Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 3. – С. 276–288. DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. – EDN: EJOWFD.
8. Яновский, Т.А. Многомерный регрессионный анализ и его приложения на основе пакета STATISTICA: учеб. пособие / Т.А. Яновский, А.Г. Яновский. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 64 с. – EDN: VHVBJF.

Математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, получаемой в устройствах с сетками
Mathematical model for predicting the expansion rate of fire extinguishing foam produced in devices with meshes

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

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

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

Email: alexlikh20@gmail.com

SPIN-код: 1837-8150

Aleksey O. Likhomanov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Associate Professor

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

Email: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

ScopusID: 57210911673

Гараев Юрий Владимирович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности,
преподаватель

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

Email: y.garaev@icloud.com

SPIN-код: 8162-6836

Yuriy V. Garaev

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic System Security,
Lecturer

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

Email: y.garaev@icloud.com

ORCID: 0000-0002-4980-2712

Вашкевич Дмитрий Андреевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», оперативно-
аналитический отдел, старший инспектор

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

Email: gogodimago@gmail.com

Dmitriy A. Vashkevich

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Operational and Analytical Department,
Senior Inspector

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

Email: gogodimago@gmail.com

ORCID: 0009-0001-3403-4474

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE EXPANSION RATE OF FIRE EXTINGUISHING FOAM PRODUCED IN DEVICES WITH MESHES**Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V., Vashkevich D.A.**

Purpose. Based on the results of experimental studies, a mathematical model is developed for predicting the foam multiplicity, taking into account the main parameters of the foam formation process on the grids of foam-generating devices.

Methods. The general methodology of the work included the theoretical (analysis, synthesis, comparison) and experimental research methods. The foam expansion rate was determined experimentally using the developed method. Processing of experimental data and creation of a mathematical model included the use of statistical regression analysis.

Findings. As a result of the research, experimental data were obtained on the dependence of the foam multiplicity on a number of parameters of the foaming process on the mesh of foam-generating devices (mesh cell size, distance from nozzle outlet to mesh, nozzle outlet diameter, foaming solution flow velocity and its properties). In particular, to take into account the size of the mesh cell, a generalized parameter K_m was used, reflecting the proportion of the part filled with wire from the entire surface area of the mesh. The flow velocity of the foaming solution and its properties are taken into account using the capillarity number Ca . Based on the analysis and generalization of the obtained data, the mathematical model was developed for predicting the expansion rate of fire-extinguishing foam, reflecting the listed parameters of foam formation on the meshes. The predicted values according to the developed model coincide with the experimental values (analysis of residuals confirmed the adequacy of the model). The average error in calculating the foam expansion ratio is less than 10 %.

Application field of research. Design and operation of foam-generating devices with meshes. The proposed model allows for the selection of the required foam-generating device configuration taking into account the foam concentrate used and the foam solution flow conditions to produce the most effective fire extinguishing foam.

Keywords: foam-generating device, mesh, foam expansion rate, mathematical model.

(The date of submitting: January 12, 2026)

REFERENCES

1. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. *Pennye orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing installations]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus). ISBN: 978-985-590-186-1.
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus). ISBN: 978-985-590-050-5.
3. Kamlyuk A.N., Morozov A.A., Parmon V.V. *Stvol pozharный ruchnoy universal'nyy kombinirovannyi s vozmozhnost'yu izmeneniya raskhoda ognetushashchego sredstva: ot modelirovaniya do ognevykh ispytaniy* [A universal combined hand-held fire nozzle with the ability to change the flow rate of fire extinguishing agent: from modeling to fire testing]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2024. 189 p. (rus). ISBN: 978-985-590-220-2.
4. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F. Tushenie plameni gidrofobnykh materialov vodnymi rastvorami smachivateley [Extinguishing flames of hydrophobic materials by water solutions of wetting agent]. *Fire and Explosion Safety*, 2015. Vol. 24, No. 3. Pp. 61–68. (rus). EDN: TUBQAX.
5. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G., Grachulin A.V. Mathematical model of foam expansion rate generated in sprinklers. *Magazine of Civil Engineering*, 2024. Vol. 17, No. 7. Article 13102. 11 p. DOI: 10.34910/MCE.131.2.
6. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Govor E.G. *Zavisimost' ob'emnoy ustoychivosti nizkokratnykh pen ot ikh kratnosti* [Dependence of the volume stability of low-expansion foam on the expansion rate]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024. Vol. 69, No. 4. Pp. 194–205. (rus). DOI:10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205. EDN: SQVQWY.
7. Kamlyuk A.N. *Kolichestvennoe opisanie mekhanizmov obrazovaniya vozdushno-mekhanicheskoy peny nizkoy kratnosti dlya nuzhd pozharotusheniya* [Quantitative description of the mechanisms of formation of low multiplicity air-mechanical foam for firefighting needs]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 3. Pp. 276–288. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-3.276. EDN: EJOWFD.

8. Yanovskiy T.A., Yanovskiy A.G. *Mnogomernyy regressionnyy analiz i ego prilozheniya na osnove paketa STATISTICA* [Multivariate regression analysis and its applications based on the STATISTICA package]: textbook. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2015. 64 p. EDN: VHVBJF.

Copyright © 2026 Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Garaev Yu.V., Vashkevich D.A.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.