

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРАТНОСТИ ОГNETУШАЩЕЙ ПЕНЫ, ПОЛУЧАЕМОЙ В РОЗЕТОЧНЫХ ОРОСИТЕЛЯХ****Камлюк А.Н., Лихоманов А.О.**

*Цель.* На основе результатов экспериментальных исследований разработать математическую модель для прогнозирования кратности пены с учетом основных параметров процесса пенообразования в оросителях розеточного типа для автоматических установок пожаротушения.

*Методы.* Общая методология работы предусматривала использование теоретических (анализ, синтез, сравнение) и экспериментальных методов исследования. Кратность пены определялась экспериментальным путем по разработанной методике. Статистический анализ экспериментальных данных и создание математической модели включали регрессионный и корреляционный анализы, а также анализ остатков, в том числе нормальность их распределения с помощью критерия Пирсона.

*Результаты.* На основе экспериментальных данных разработана математическая модель, позволяющая оценивать кратность пены в зависимости от геометрических параметров оросителя, гидродинамических условий и физико-механических свойств пенообразующего раствора. Структура модели включает безразмерные комплексы, отражающие влияние коэффициента рабочей поверхности розетки  $K_s$ , относительной длины дужек  $L_f/D$ , относительного диаметра розетки  $D/D_{\max}$  и числа капиллярности  $Ca$ , что обеспечивает комплексный учет геометрии оросителя и режимных параметров процесса пенообразования. Среднее отклонение расчетных значений кратности пены от экспериментальных составляет 11 %, а максимальное – 27 %. Анализ остатков показал отсутствие систематической зависимости между остатками и прогнозными значениями, а также подтвердил нормальность распределения остатков. Кроме того, выявленные в ходе эксперимента зависимости указывают на сложный характер влияния геометрических параметров оросителя, в частности относительной длины дужек  $L_f/D$ , на кратность пены. Наиболее значимый прирост кратности обеспечивается при увеличении числа капиллярности и коэффициента рабочей поверхности розетки, тогда как влияние относительного диаметра розетки носит менее выраженный характер.

*Область применения исследований.* Проектирование и эксплуатация оросителей розеточного типа для автоматических установок пожаротушения. Предложенная модель позволяет подбирать необходимую конфигурацию процесса пенообразования с учетом применяемого пенообразователя, условий подачи пенообразующего раствора, а также основных геометрических параметров оросителя для получения пены с заданной кратностью.

*Ключевые слова:* автоматическая установка пожаротушения, ороситель, розетка, кратность пены, математическая модель.

(Поступила в редакцию 12 марта 2026 г.)

**Введение**

Для тушения пожаров твердых и жидких горючих веществ, не взаимодействующих с водой, применяют воздушно-механическую пену низкой кратности (от 4 до 20), причем в этом диапазоне более высокая кратность, как правило, обеспечивает большую огнетушащую эффективность [1–4]. На практике пену получают с помощью оросителей в автоматических установках пожаротушения, сеток в насадках пожарных стволов или в установках генерирования компрессионной пены. Последние позволяют регулировать подачу воды, пенообразователя и воздуха в реальном времени, тем самым контролируется кратность пены. В отличие от таких установок, в оросителях и насадках пожарных стволов такая возможность отсутствует. В связи с этим устройства пенообразования разделяют на две категории: с регулируемой и нерегулируемой кратностью пены [5].

При возможности регулирования повышение огнетушащей эффективности достигается, например, за счет управления расходом воздуха непосредственно при тушении. В случае применения устройств без возможности регулирования кратности ключевое значение приобретает заблаговременный выбор параметров устройств и средств пожаротушения, что выдвигает на первый план необходимость прогнозирования кратности пены. Для этого требуется использовать модели, учитывающие геометрические особенности применяемых

устройств, гидродинамические параметры подачи раствора пенообразователя и его физико-механические свойства.

Так, с целью прогнозирования значения кратности пены, генерируемой оросителями для автоматических установок пожаротушения, в работе [6] 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 с внешним диаметром 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 ( $D_{\max} = 400$  мм);

$We$  – 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 с помощью критерия подобия  $We$ , а также свойства применяемого пенообразующего раствора через эмпирический коэффициент  $\gamma_{e,r}$ .

В данной работе описаны результаты исследований, основной целью которых являлось построение аналогичной математической модели для прогнозирования кратности пены, получаемой при использовании оросителей розеточного типа, для учета гидродинамики струи пенообразующего раствора и его свойств применялось число капиллярности  $Ca$  – гидродинамический критерий подобия, определяемый по формуле [7; 8]:

$$Ca = \eta v / \sigma, \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости жидкости;

$v$  – средняя скорость потока жидкости;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Число капиллярности наряду с числом Бонда или числом Вебера используется для описания гидродинамики изучаемых процессов. Оно позволяет определить характер деформации струй жидкости. При малых значениях  $Ca$  поверхностное натяжение жидкости стремится придать струе цилиндрическую форму, разрушая ее на достаточно крупные капли, а при высоких, когда преобладают вязкие силы, происходит интенсивное рассеивание струи на мелкие частички и капли с большей площадью свободной поверхности (рис. 1) [9].

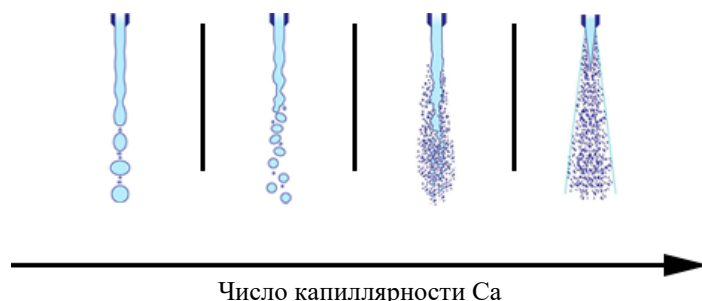
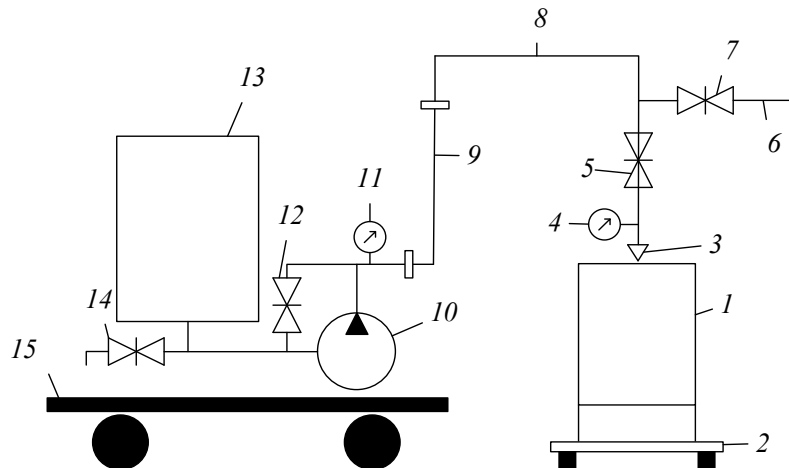


Рисунок 1. – Характер деформации струи жидкости при изменении числа капиллярности

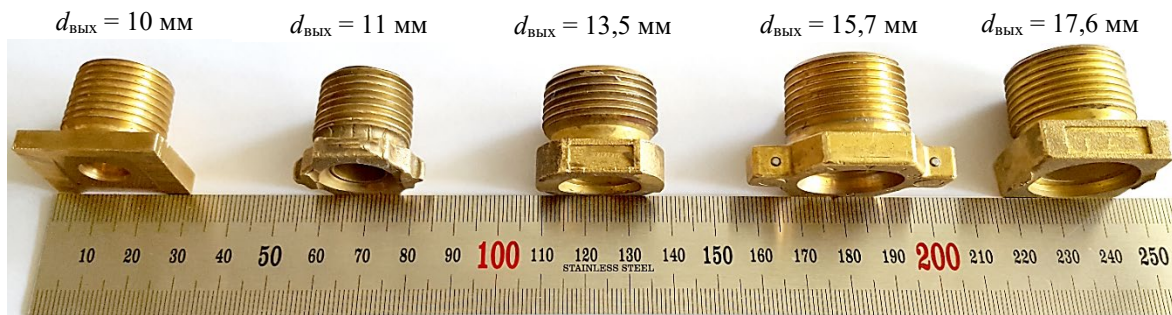
### Основная часть

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



1 – мерная емкость; 2 – весы; 3 – ороситель; 4, 11 – манометр; 5, 7, 12, 14 – запорный вентиль; 6, 8 – трубопровод; 9 – напорный рукав; 10 – насос; 13 – емкость с рабочим раствором пенообразователя; 15 – каркас установки  
**Рисунок 2. – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процесса образования пены в розеточных оросителях**

При проведении экспериментальных исследований использовались штуцеры оросителя с различным диаметром выходного отверстия  $d_{\text{вых}}$  (рис. 2), что позволило изменять гидродинамические параметры потока (давление и скорость) на выходе из оросителя при постоянном давлении, создаваемом насосной установкой.



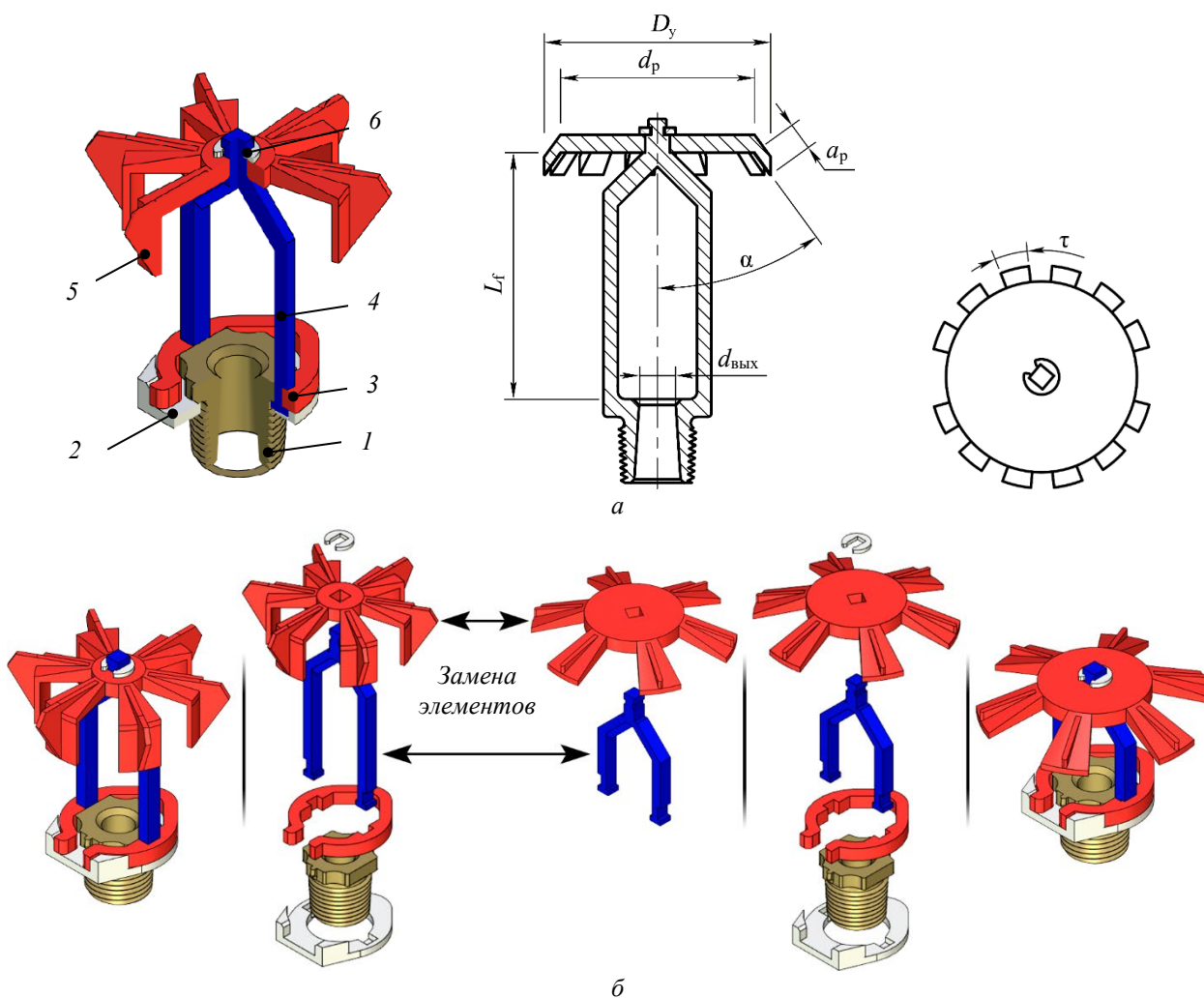
**Рисунок 2. – Внешний вид штуцеров оросителя для исследования процесса образования пены в розеточных оросителях**

Изменять геометрию основных составных элементов розеточного оросителя, дужек и розетки, для проведения эксперимента удалось путем использования конструкции сборно-разборного оросителя<sup>1</sup> (рис. 3), позволяющего комбинировать элементы с различными размерами, что существенно снизило количество необходимых экспериментальных образцов. Для исследований основными параметрами геометрии оросителя были приняты:  $L_f$  – длина дужек;  $D$  – внешний диаметр розетки, выражаемый через ее внутренний диаметр и длину лопастей:  $D = d_p + 2a_p$ ;  $K_s$  – коэффициент рабочей поверхности розетки, который представляет собой отношение площади поверхности розетки, взаимодействующей с потоком жидкости в процессе разбрызгивания раствора пенообразователя, и мнимой площади заполненной поверхности розетки (без пустых промежутков между лопастями) и рассчитывается по формуле [1]:

$$K_s = \frac{360d_p^2 \sin \alpha + \sum \tau (D_y^2 - d_p^2)}{360(d_p^2 \sin \alpha + D_y^2 - d_p^2)} \cdot 100\% \quad (3)$$

где  $D_y$  – диаметр проекции розетки на горизонтальную плоскость;  
 $d_p$  – внутренний диаметр розетки;  
 $\tau$  – угол лопасти розетки;  
 $\alpha$  – угол конусности лопастей розетки.

<sup>1</sup> Патент ВУ 11801, МПК А 62С 31/00 (2006.01): Сборно-разборный дренажный ороситель: № и 20180045: заявлено 14.02.2018: опублик. 30.10.2018 / Камлюк А.Н., Грачулин А.В., Лихоманов А.О., Говор Э.Г.; заявитель: Университет гражданской защиты. – URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=17510> (дата обращения: 05.03.2026).



1 – штуцер; 2 – дужки; 3 – розетка; 4 – фиксатор; 5 – прижим; 6 – шайба;  
 $D_y$  – диаметр проекции розетки на горизонтальную плоскость;  $a_p$  – длина лопасти розетки;  $d_p$  – внутренний диаметр розетки;  $\tau$  – угол лопасти розетки;  $\alpha$  – угол конусности лопастей розетки;  $L_f$  – длина дужек  
**Рисунок 3.** – Внешний вид и геометрические параметры сборно-разборного оросителя (а), а также примерная схема замены его составных элементов в процессе исследования (б)

При проведении экспериментальных исследований использовались конфигурации розеточного оросителя, имеющие следующие значения параметров геометрии:  $L_f = 30, 50, 80, 100, 150$  мм;  $K_s = 50, 64, 87, 100$  %;  $D = 20, 30, 50, 100$  мм.

Для приготовления пенообразующего раствора использовались пенообразователи различных марок, отличающихся как химическим составом, так и назначением. В частности, были отобраны наиболее широко используемые пенообразователи общего назначения (тип S) по СТБ 2459<sup>2</sup> двух марок, ПО-6РЗ (6 %) и Синтек-6НС (6 %), а также пенообразователь, применяемый для тушения пожаров в качестве смачивателя (тип WA) марки ОПС-0,4 (1 %). В процессе исследований для получения пены использовался 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.

В таблице 1 представлены основные физические характеристики рабочих растворов отобранных пенообразователей. Значения коэффициентов поверхностного натяжения и динамической вязкости, а также плотность водного раствора каждого пенообразователя были

<sup>2</sup> 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.

определены экспериментально при использовании сертифицированного и поверенного в установленном порядке лабораторного оборудования: автоматического тензиометра Kruss K20, весов лабораторных МАССА-К ВК-1500, колбы мерной 1000 мл, капиллярного вискозиметра ВПЖ-4 1.47 и секундомера механического СОПр-2а-3-000. Следует отметить, что рассматриваемые растворы пенообразователей относятся к ньютоновским жидкостям, вязкость которых не зависит от скорости деформации (т.е. коэффициент динамической вязкости остается постоянным независимо от скорости потока жидкости). Значения коэффициента динамической вязкости в таблице 1 получены из значений коэффициента кинематической вязкости, определенных с помощью капиллярного вискозиметра, с учетом плотности растворов.

**Таблица 1. – Физические характеристики водных растворов пенообразователей**

| Характеристика раствора пенообразователя           | Марка пенообразователя |                  |               |
|--|------------------------|------------------|---------------|
|  | ПО-6РЗ (6 %)           | Синтек-6НС (6 %) | ОПС-0,4 (1 %) |
| Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>               | 1000,7±0,1             | 1003,4±0,1       | 1000,1±0,1    |
| Поверхностное натяжение $\sigma \times 10^3$ , Н/м | 22,46±0,05             | 29,05±0,02       | 31,23±0,11    |
| Динамическая вязкость $\eta \times 10^3$ , (Па·с)  | 1,01±0,01              | 1,04±0,01        | 1,02±0,01     |

Методика определения кратности пены заключалась в следующем. При использовании экспериментальной установки (рис. 1) рабочий раствор пенообразователя подавался из емкости 13 с помощью насоса 10 по напорному рукаву 9 и трубопроводу 8 к запорным вентилям 5 и 7, которые находились в закрытом положении. Далее с целью настройки равномерной работы установки и создания необходимого рабочего давления открывался запорный вентиль 7 и раствор подавался через трубопровод 6 в дренаж не менее 20 с. Одновременно с помощью вентиля 12 по показаниям манометра 11 устанавливалось давление 0,15 МПа. После настройки установки вентиль 7 закрывался, а вентиль 5 открывался, тем самым раствор пенообразователя подавался через ороситель 3, с помощью которого генерировалась пена и попадала в мерную емкость 1. Опыт прекращался при заполнении мерной емкости. Затем кратность пены определялась по формуле:

$$K = \frac{V_e \cdot \rho_{p-pa}}{m_2 - m_1}, \quad (4)$$

где  $V_e$  – объем мерной емкости;  
 $m_1$  – масса мерной емкости;  
 $m_2$  – масса мерной емкости, заполненной пеной;  
 $\rho_{p-pa}$  – плотность раствора пенообразователя.

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

Средняя скорость потока жидкости на выходе из насадка определялась исходя из расхода раствора пенообразователя через ороситель при давлении на насосе 0,15 МПа (выбор давления связан с техническими ограничениями насосной установки). Для этого емкость 13 (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 ороситель 3 в мерную емкость 1. С помощью секундомера определялось время прохождения уровня жидкости в емкости 13 от верхней до нижней меток, а также фиксировалось давление перед оросителем по манометру 4. Далее скорость потока жидкости из выходного отверстия насадка определялась по формуле:

$$v = \frac{4V_{yч}}{\pi d_{вых}^2 t}, \quad (5)$$

где  $V_{yч}$  – объем жидкости между верхней и нижней метками в емкости 13 (рис. 2);  
 $t$  – время прохождения уровня жидкости от верхней до нижней меток в емкости 13.

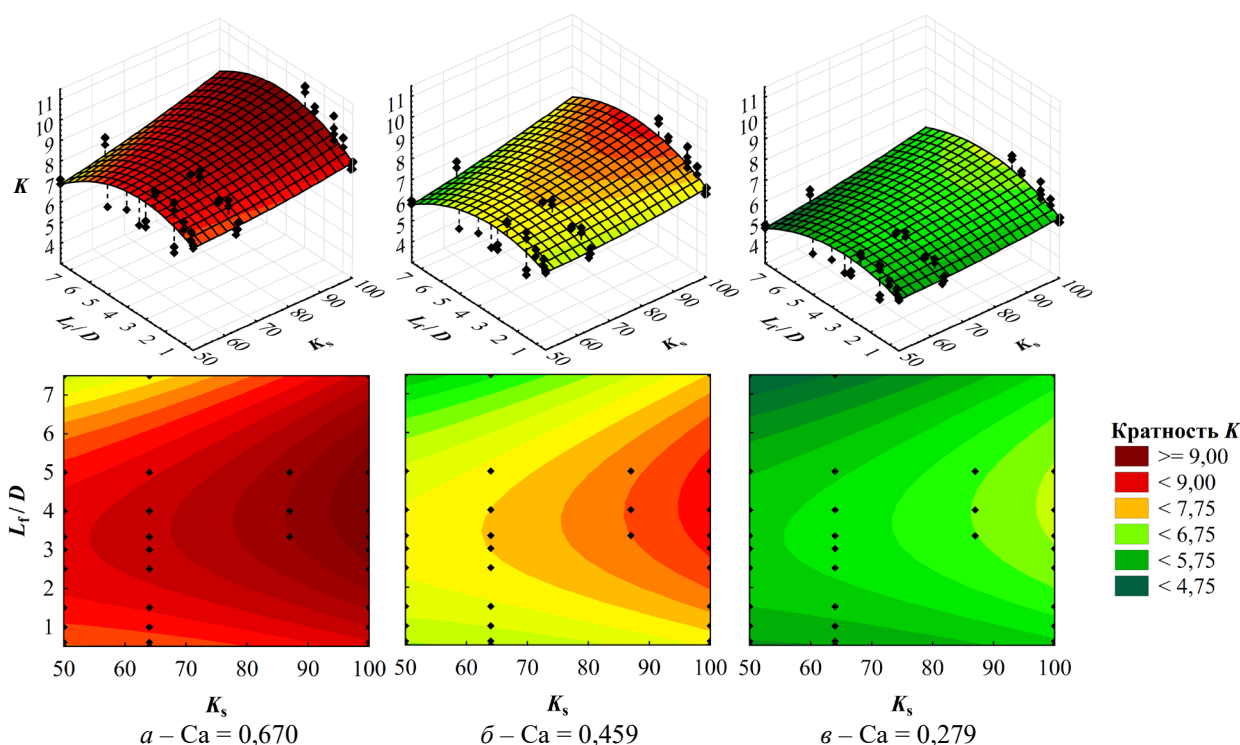
Экспериментальные значения расхода, средней скорости и давления потока жидкости перед насадком представлены в таблице 2.

**Таблица 2. – Экспериментальные значения средней скорости, давления перед оросителем, расхода и числа капиллярности**

| Диаметр выходного отверстия насадки, мм | Средняя скорость, м/с | Давление перед оросителем, МПа | Расход, (м <sup>3</sup> /с) × 10 <sup>-4</sup> | Число капиллярности |                  |               |
|---|-----------------------|--------------------------------|--|---------------------|------------------|---------------|
|   |                       |                                |  | ПО-6РЗ (6 %)        | Синтек-6НС (6 %) | ОПС-0,4 (1 %) |
| 10,0                                    | 14,9                  | 0,10                           | 11,70  | 0,279               | 0,358            | 0,382         |
| 11,0                                    | 13,8                  | 0,10                           | 13,11  | 0,382               | 0,394            | 0,428         |
| 13,5                                    | 10,2                  | 0,05                           | 14,60  | 0,459               | 0,483            | 0,477         |
| 15,7                                    | 8,5                   | 0,04                           | 16,46  | 0,621               | 0,562            | 0,538         |
| 17,6                                    | 6,2                   | 0,02                           | 15,08  | 0,670               | 0,630            | 0,493         |

Результаты эксперимента по определению кратности пены с использованием оросителей представлены на рисунках 4 и 5. Для удобства визуального анализа по экспериментальным значениям (отмечены закрашенными черными ромбами) построены трехмерные и двухмерные поверхности с помощью метода квадратичной аппроксимации данных. Точность описания данными поверхностями фактически полученных экспериментальных значений достаточна для анализа тенденции изменения зависимой переменной от исследуемых факторов (значения коэффициента детерминации составляют не менее 60 %).

При рассмотрении полученных зависимостей видно, что наибольшие значения кратности пены наблюдаются при максимальном значении числа капиллярности в рамках исследуемого диапазона значений данного параметра независимо от рассматриваемой области поверхностей. При этом уменьшение числа капиллярности приводит к постепенному снижению кратности пены. Аналогичная ситуация и с параметром рабочей поверхности розетки. При прочих равных условиях наименьшие значения кратности пены наблюдаются при значениях  $K_s$  ближе к нижней границе исследуемого диапазона, а наибольшие – при  $K_s$  близких к 100 %. Таким образом, при составлении математической модели необходимо учитывать положительную тенденцию изменения кратности пены с ростом параметров  $Ca$  и  $K_s$ .



**Рисунок 4. – Зависимость кратности пены от безразмерных параметров  $L_t / D$  и  $K_s$  при различных значениях числа капиллярности**

Зависимость кратности пены от параметра  $D / D_{max}$  имеет иной характер. Как видно на рисунке 5, при прочих равных наибольшие значения кратности пены сохраняются при изменении указанного параметра в достаточно широком диапазоне от 0,1 до 0,7, а затем несущественно снижаются в диапазоне от 0,7 до 1,0, что свидетельствует об обратной зависимости.

Наиболее сложной является зависимость кратности пены от длины дужек приведенной к внешнему диаметру розетки ( $L_f/D$ ). В данном случае имеется две области: первая – от 0,5 до 3,0, где наблюдается постепенное повышение кратности пены до наибольших значений, и вторая – от 3,0 до 7,5, где кратность пены снижается с пиковых значений до минимальных.

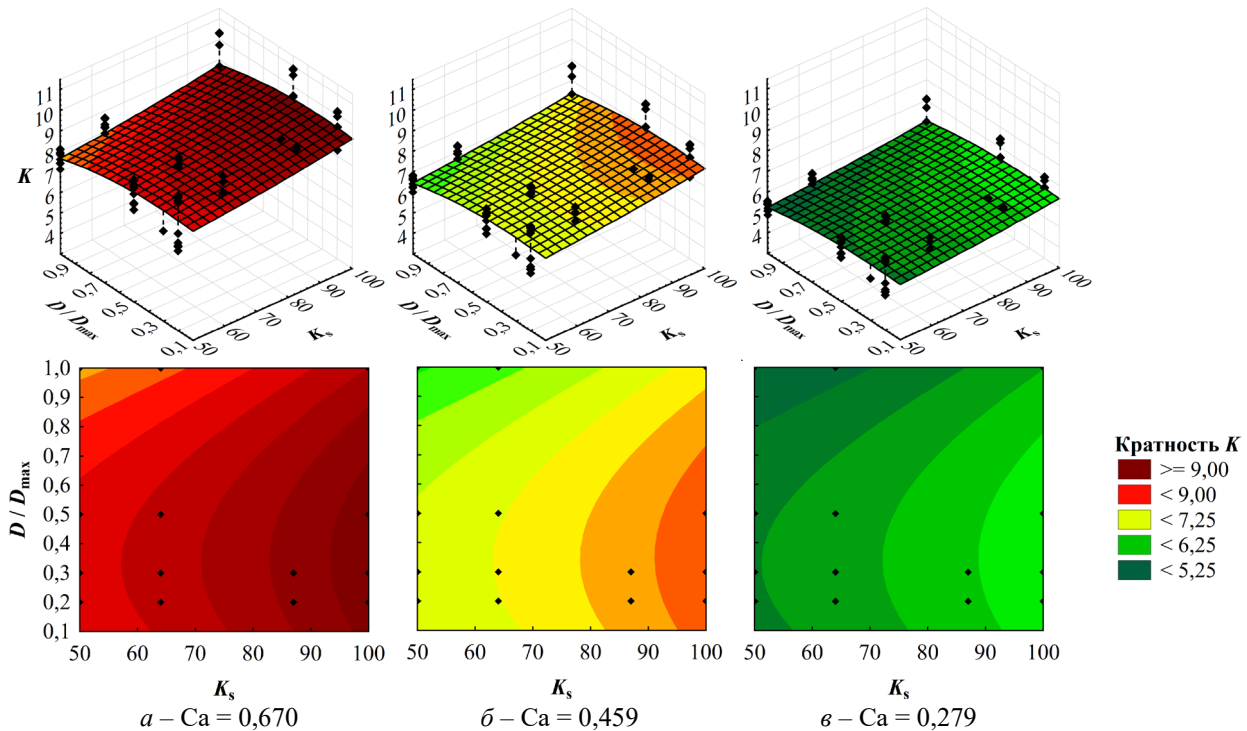


Рисунок 5. – Зависимость кратности пены от безразмерных параметров  $D/D_{max}$  и  $K_s$  при различных значениях числа капиллярности

С учетом выявленных тенденций изменения кратности пены при варьировании основных параметров геометрии оросителя, гидродинамики струи и свойств пенообразователя далее представлены результаты разработки модели для прогнозирования данной характеристики пены при генерировании в оросителях розеточного типа, а также проведена оценка ее точности и адекватности.

**Разработка математической модели.** Принимая во внимание ранее обозначенные основные исследуемые параметры процесса образования пены в оросителях, а также модель согласно [6], обобщенный вид математической модели для прогнозирования кратности огнетушащей пены может быть представлен следующим образом:

$$K = Ca^a K_s^b \left( \frac{L_f}{D} \right)^c \left( \frac{D}{D_{max}} \right)^d, \quad (6)$$

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

Поиск значений степеней в уравнении (6) выполнялся с помощью 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. Принимая во внимание то, что в текущей работе диапазоны и конкретные значения параметров эксперимента были аналогичны принятым в работе [6], значения степеней при факторах  $K_s, L_f/D$  и  $D/D_{max}$  остались неизменными по сравнению с формулой (1). Для зависимости  $\ln(K) = f(Ca)$  построена прямая линии регрессии с использованием метода наименьших квадратов и установлен угловой коэффициент –  $a = 0,3$  (рис. 6).

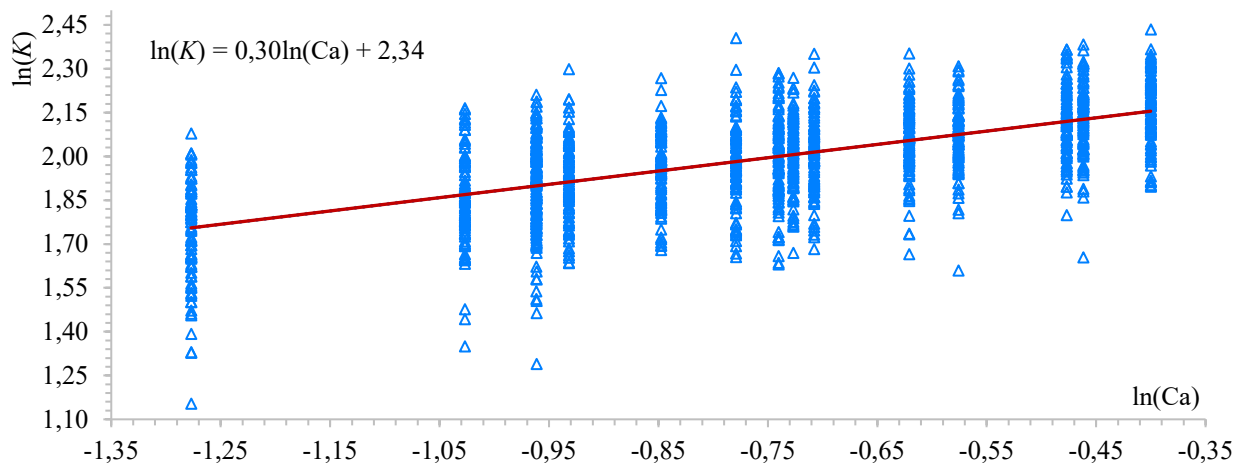


Рисунок 6. – Зависимость логарифма кратности пены от логарифма числа капиллярности

Таким образом, математическая модель для прогнозирования кратности пены имеет следующий вид:

$$K = Ca^{0,3} K_s^{0,5} \left(\frac{L_f}{D}\right)^c \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^{(-0,05)}, \quad c = \begin{cases} 0,1 & \text{при } L_f / D \leq 3,0; \\ -0,03 & \text{при } 3,0 < L_f / D \leq 7,5. \end{cases} \quad (7)$$

Среднее отклонение теоретических значений кратности пены, рассчитанных по формуле (7), от экспериментальных составляет 11 %, при этом максимальное отклонение – 27 %. Область адекватности модели ограничивается следующими диапазонами значений факторов:  $Ca = 0,279-0,670$ ;  $K_s = 50-100 \%$ ,  $L_f = 30-150$  мм;  $D = 20-100$  мм.

Для подтверждения адекватности разработанной модели проведен анализ остатков (разность между экспериментальными значениями зависимой переменной и их прогнозными значениями по модели). Остатки – случайные величины, не должны зависеть от прогнозных по моделям значений зависимой переменной. Исходя из представленных на рисунке 6а данных видно, что систематической зависимости значений остатков от прогнозных значений зависимой переменной не наблюдается (коэффициент корреляции  $r = -0,02$ ), следовательно, по данному критерию модель (7) можно считать адекватной.

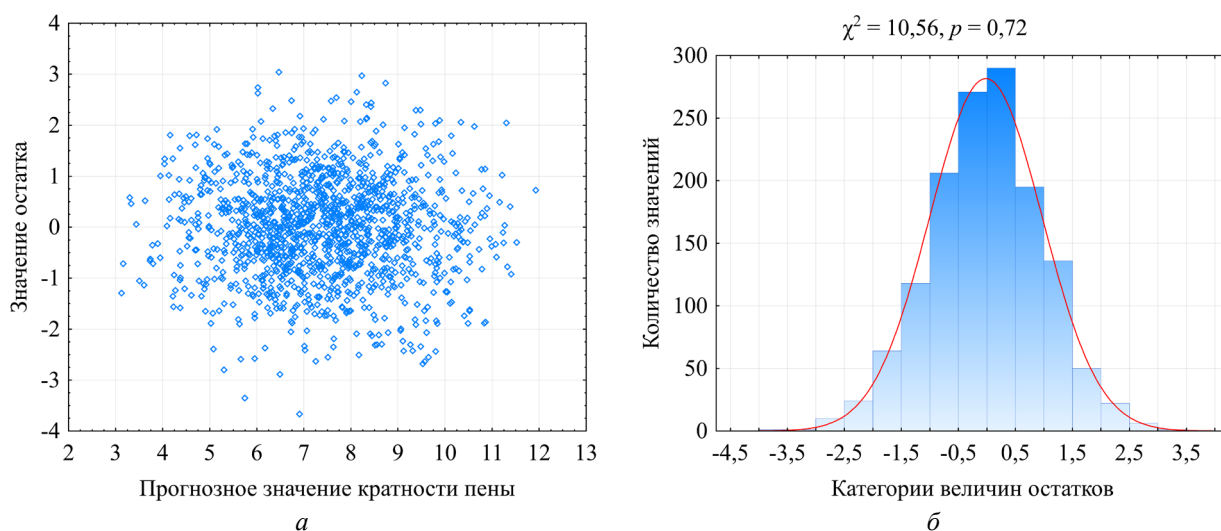


Рисунок 7. – График рассеяния остатков в зависимости от прогнозных значений зависимой переменной (а) и гистограмма распределения остатков (б)

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» [10]. С помощью данного модуля

построена гистограмма распределения остатков, которая представлена на рисунке 7б. Здесь указаны значения критерия согласия  $\chi^2$  и уровень 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).

### Заключение

В рамках текущей работы представлены результаты исследований, позволяющие продвинуться в решении актуальной задачи прогнозирования кратности воздушно-механической пены, генерируемой розеточными оросителями. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель, позволяющая с высокой степенью достоверности оценивать кратность пены в зависимости от геометрических параметров оросителя, гидродинамических условий и физико-механических свойств пенообразующего раствора.

В отличие от известных подходов, в предложенной модели (7) для описания гидродинамики струи и свойств жидкости использовано число капиллярности  $Ca$ . Данный критерий учитывает соотношение вязких сил и сил поверхностного натяжения, что позволяет более точно характеризовать процесс деформации и диспергирования струи раствора пенообразователя. Структура модели помимо числа капиллярности включает безразмерные комплексы, отражающие влияние коэффициента рабочей поверхности розетки  $K_s$ , относительной длины дужек  $L_f/D$  и относительного диаметра розетки  $D/D_{max}$ , что обеспечивает комплексный учет геометрии оросителя и режимных параметров процесса пенообразования.

Статистическая верификация разработанной модели подтвердила ее высокую точность и адекватность. Среднее отклонение расчетных значений кратности пены от экспериментальных составляет 11 %, максимальное – 27 %, что является приемлемым для инженерных расчетов. Анализ остатков показал отсутствие систематической зависимости между остатками и прогнозными значениями (коэффициент корреляции  $r = -0,02$ ), а также подтвердил нормальность распределения остатков (значения уровня значимости критерия  $\chi^2$  превышают 0,05). Это свидетельствует о корректности выбранной формы модели и значимости входящих в нее факторов.

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность использования числа капиллярности в качестве обобщающего критерия при моделировании процессов пенообразования в розеточных оросителях. Выявленные в ходе эксперимента зависимости указывают на сложный немонотонный характер влияния геометрических параметров, в частности отношения длины дужек к диаметру розетки  $L_f/D$ , что требует особого внимания при проектировании устройств с целью достижения максимальной кратности пены. Установлено, что наиболее значимый прирост кратности обеспечивается при увеличении числа капиллярности и коэффициента рабочей поверхности розетки, тогда как влияние относительного диаметра розетки носит менее выраженный характер. Эти закономерности могут служить практическими ориентирами для оптимизации конструкции оросителей еще на этапе проектирования.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение границ адекватности модели за счет включения в экспериментальную базу данных оросителей с большим диапазоном геометрических параметров, а также пенообразователей различных типов, включая фторсинтетические и пленкообразующие составы. Кроме того, представляет интерес дальнейшее совершенствование модели путем введения дополнительных критериев подобия, учитывающих влияние турбулентности потока и геометрии проточного тракта, а также разработка на основе предложенной модели инженерной методики расчета, адаптированной для практического использования при проектировании автоматических установок пожаротушения.

### 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. Камлюк, А.Н. Математическая модель для прогнозирования кратности огнетушащей пены, получаемой в устройствах с сетками / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, Д.А. Вашкевич, Ю.В. Гараев // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2026. – Т. 10, № 1. – С. 53–64. – DOI: 10.33408/2519-237X.2026.10-1.53. – EDN: HVTTAR.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Lin, S.P. Drop and spray formation from a liquid jet / S.P. Lin, R.D. Reitz // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1998. – Vol. 30. – P. 85–105. – DOI: 10.1146/annurev.fluid.30.1.85.
10. 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 розеточных оросителях**

**Mathematical model for predicting fire-extinguishing foam expansion rate  
in deflector type sprinklers**

---

***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

## MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING FIRE-EXTINGUISHING FOAM EXPANSION RATE IN DEFLECTOR TYPE SPRINKLERS

Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O.

*Purpose.* Based on the results of experimental studies, develop a mathematical model for predicting the foam multiplicity, taking into account the main parameters of the foam formation process in deflector type sprinklers for automatic fire extinguishing systems.

*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. Statistical analysis of experimental data and formulation of the mathematical model included regression and correlation analyses, as well as analysis of residuals, including the normality of their distribution using the Pearson criterion.

*Findings.* Based on experimental data, the mathematical model has been developed for predicting fire-extinguishing foam expansion rate based on sprinkler geometry, hydrodynamic conditions, and the physical and mechanical properties of the foaming solution. The model's structure includes dimensionless complexes reflecting the influence of the effective surface area coefficient of the deflector  $K_{ss}$ , the relative length of the frame arms  $L_f/D$ , the relative diameter of the deflector  $D/D_{max}$ , and the capillarity number  $Ca$ , providing a comprehensive account of the sprinkler geometry and foaming process parameters. The average deviation of the calculated foam expansion rate values from the experimental data does not exceed 11 %, and the maximum deviation is 27 %. An analysis of the residuals revealed no systematic relationship between the residuals and the predicted values and confirmed the normality of the residual distribution. Furthermore, the relationships identified during the experiment indicate the complex influence of the sprinkler's geometric parameters on foam expansion rate, particularly relative length of the frame arms  $L_f/D$ . The most significant increase in foam expansion rate is achieved by increasing the capillarity number and the working surface coefficient of the deflector, while the influence of the relative diameter of the deflector is less pronounced.

*Application field of research.* Design and operation of deflector sprinklers for automatic fire extinguishing systems. The proposed model allows for the selection of the required foam generation configuration, taking into account the foam concentrate used, the foam solution delivery conditions, and the sprinkler's key geometric parameters to produce foam with a specified expansion rate.

*Keywords:* automatic extinguishing system, sprinkler, deflector, foam expansion rate, mathematical model.

(The date of submitting: March 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 ogetushashchego 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., Garaev Yu.V., Vashkevich D.A. Matematicheskaya model' dlya prognozirovaniya kratnosti ogetushashchey peny, poluchaemoy v ustroystvakh s setkami [Mathematical model for predicting the expansion rate of fire extinguishing foam produced in devices with meshes]. *Journal of Civil Protection*, 2026. Vol. 10, No. 1. Pp. 53–64. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2026.10-1.53. EDN: HVT TAR.
6. 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.

7. 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.
8. Kamlyuk A.N. *Kolichestvennoe opisaniye mekhanizmov obrazovaniya vozdušno-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.
9. Lin S.P., Reitz R.D. Drop and spray formation from a liquid jet. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1998. Vol. 30. Pp. 85–105. DOI: 10.1146/annurev.fluid.30.1.85.
10. 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.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.