

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУЖЕК И РОЗЕТКИ ОРОСИТЕЛЯ НА КРАТНОСТЬ ПЕНЫ

Говор Э.Г., Лихоманов А.О., Камлюк А.Н., Говор Т.А., Ярец В.А.

*Цель.* Определение зависимости кратности воздушно-механической пены от гидродинамических параметров струи водного раствора синтетического углеводородного пенообразователя, не содержащего фторированных поверхностно-активных веществ, с учетом варьирования геометрических параметров составных частей розеточного оросителя (штуцера, дужек и розетки).

*Методы.* В работе применены теоретические методы анализа, сравнения и синтеза, а также метод полного факторного эксперимента для получения регрессионной модели.

*Результаты.* При использовании синтетического углеводородного пенообразователя, не содержащего фторированных поверхностно-активных веществ, марки Синтек-6НС (6 %), который относится к пенообразователям общего назначения (тип S) согласно СТБ 2459-2016, проведен полный факторный эксперимент на трех уровнях пяти факторов, влияющих на кратность генерируемой оросителем пены: число Вебера  $We = 23\ 100, 47\ 900$  и  $75\ 900$ , длина дужек  $L = 30, 50$  и  $150$  мм, коэффициент рабочей поверхности розетки  $K_s = 50, 64$  и  $100$  %, внешний диаметр розетки  $D = 20, 50$  и  $100$  мм и угол наклона лопастей розетки  $\alpha = 15, 30$  и  $45^\circ$ . В результате анализа экспериментальных данных разработана регрессионная модель для прогнозирования кратности пены в исследованных диапазонах изменения числа Вебера  $We$  и геометрических параметров дужек и розетки оросителя. Для полученной модели коэффициент детерминации  $R^2$  равен  $0,93$ , что свидетельствует о высокой точности описания зависимой переменной (кратности пены) от исследованных факторов, при этом отклонение теоретических значений кратности пены от эмпирических составляет не более  $8,9$  %.

*Область применения исследований.* Разработанная регрессионная модель позволяет осуществлять подбор оптимальных конфигураций (комбинаций геометрических параметров) розеточного оросителя, в частности коэффициента рабочей поверхности розетки, внешнего диаметра и угла конусности лопастей розетки, длины дужек и диаметра выходного отверстия штуцера оросителя с целью получения воздушно-механической пены с необходимыми значением кратности в зависимости от условий и целей применения данного огнетушащего вещества.

*Ключевые слова:* установка пожаротушения, розеточный ороситель, дужки оросителя, розетка оросителя, диаметр выходного отверстия, гидродинамические параметры струи, число Вебера, воздушно-механическая пена, кратность пены, полный факторный эксперимент.

(Поступила в редакцию 7 апреля 2023 г.)

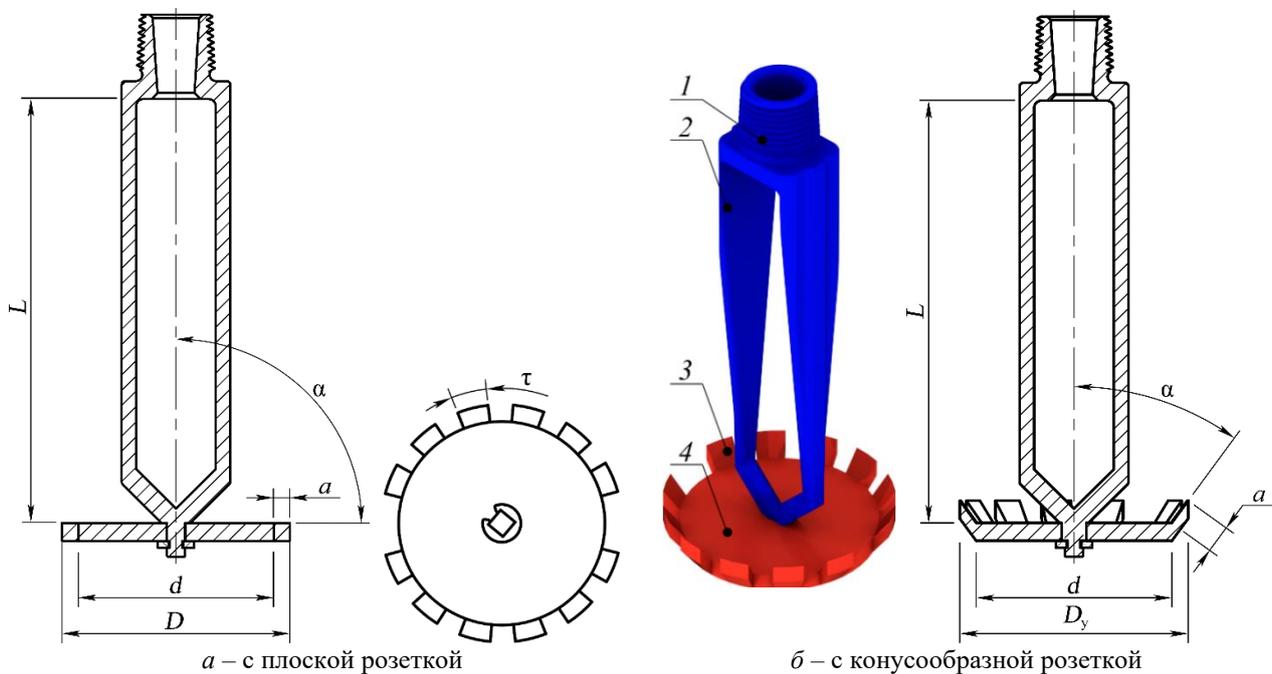
### Введение

Автоматические установки пенного пожаротушения (далее – АУП) входят в состав системы противопожарной защиты химических, нефтеперерабатывающих, металлургических и энергетических предприятий [1; 2]. Их использование позволяет без участия человека локализовать либо ликвидировать пожар на начальной стадии развития. В качестве огнетушащего вещества в АУП применяется воздушно-механическая пена – пена, образующаяся в результате механического перемешивания водного раствора пенообразователя с воздухом.

Одной из ключевых классификационных характеристик воздушно-механической пены (далее – пена) с точки зрения огнетушащей эффективности считается ее кратность – отношение объема пены к объему раствора пенообразователя, из которого она получена [3].

По кратности пены принято делить на три группы в зависимости от условий применения (способа тушения, вида горючего материала, типа пенообразователя и др.): низкой (от 3 до 20), средней (20–200) и высокой (более 200) кратности [4]. Пена низкой кратности обладает большей проникающей способностью, лучшей растекаемостью по поверхности и эффективнее охлаждает горячие поверхности по сравнению с другими типами пены [5; 6]. При этом чем выше кратность пены (имеется в виду внутри диапазона от 3 до 20), тем больше ее огнетушащая эффективность [3; 7]. Генерирование пены низкой кратности в АУП, как правило, осуществляется с помощью розеточных оросителей [5].

Известно, что кратность пены при использовании серийно выпускаемых розеточных оросителей не превышает 8. С целью увеличения кратности пены, генерируемой такими оросителями, в работах [8; 9] авторы исследовали зависимость данной характеристики от геометрических параметров розеточного оросителя. В итоге ими построена регрессионная модель в виде полинома для прогнозирования кратности пены от таких геометрических параметров оросителя, как длина дужек, внешний диаметр, угол наклона лопастей и коэффициента рабочей поверхности розетки (рис. 1) [8; 10].



**а** – с плоской розеткой  
**б** – с конусообразной розеткой  
 1 – штуцер; 2 – дужки; 3 – лопасть розетки; 4 – розетка;  $D$  – внешний диаметр розетки;  $D_y$  – проекция внешнего диаметра розетки на горизонтальную плоскость;  $a$  – длина лопасти розетки;  $d$  – внутренний диаметр розетки;  $\tau$  – угол лопасти розетки;  $\alpha$  – угол конусности лопастей розетки;  $L$  – длина дужек

**Рисунок 1. – Конструктивные элементы и геометрические параметры элементов розеточного оросителя**

Данная регрессионная модель благодаря высокой точности может быть с успехом применена на практике для инженерных расчетов при разработке новых оросителей либо при проектировании АУП для защиты объекта определенного типа. Однако область применения предложенной модели ограничена условиями проведения экспериментов и измерений, на основе которых она построена. В частности, речь идет о гидродинамических параметрах потока пенообразующего раствора, которые задаются как минимум геометрией проточного тракта штуцера оросителя. По этой причине основной целью текущих исследований является получение регрессионной модели, позволяющей оценивать влияние геометрических параметров дужек и розетки оросителя, а также гидродинамических параметров струи на кратность пены на примере синтетического углеводородного пенооб-

разователя, не содержащего фторированных поверхностно-активных веществ, марки Синтек-6НС (6%), который относится к пенообразователям общего назначения (тип S)<sup>1</sup>.

### Основная часть

Для обобщения экспериментальных данных при изучении гидродинамических параметров струй водных растворов пенообразователей принято использовать характеристическое число Вебера  $We$  (далее – число  $We$ ) [11]. Изменение геометрических параметров штуцера оросителя (рис. 1), в частности диаметра его выходного отверстия  $A$ , оказывает значительное влияние на число  $We$ . Так, в работе [11] экспериментально установлены значения числа  $We$  для 5 штуцеров с различным диаметром выходного отверстия (рис. 2). Одной из использованных в эксперименте жидкостей был рабочий водный раствор пенообразователя марки Синтек-6НС (6 %). Для построения регрессионной модели воспользуемся полученными в работе [12] экспериментальными значениями числа  $We$  для струи вышеуказанного пенообразователя.

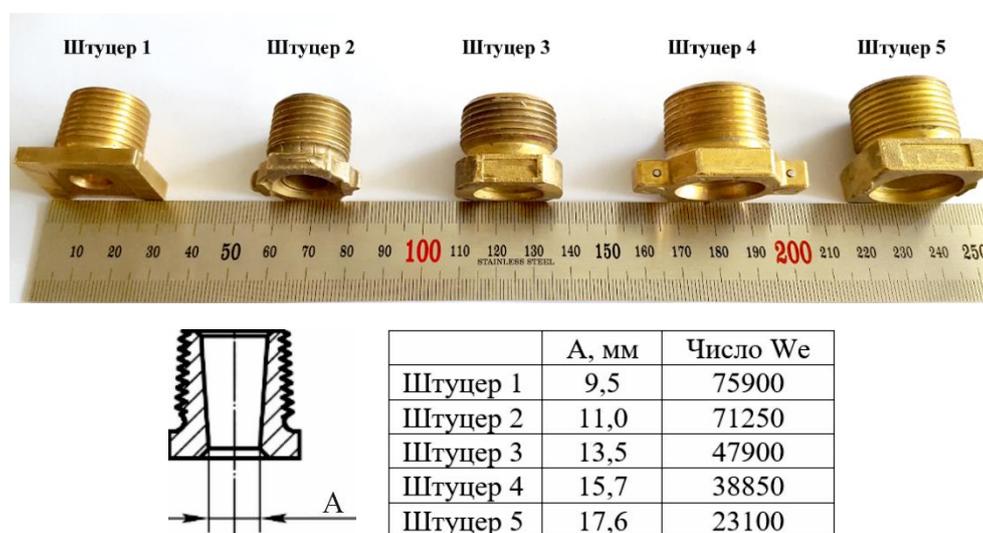


Рисунок 2. – Внешний вид и размеры выходного отверстия штуцеров оросителя

С целью построения регрессионной модели для прогнозирования кратности пены применен метод полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ). Данный метод позволяет существенно сократить количество экспериментов (наблюдений) для понимания природы исследуемого процесса в заданных диапазонах исследуемых величин. ПФЭ широко применяется для изучения влияния факторов на исследуемый процесс и поиск их оптимальных значений, при которых этот процесс протекает требуемым образом [13].

На начальном этапе ПФЭ проведен выбор факторов (независимых переменных уравнения регрессии) и отклика (зависимой переменной уравнения регрессии). В качестве главных факторов приняты: 1 – число  $We$ , 2 – длина дужек  $L$ , 3 – коэффициент рабочей поверхности розетки  $K_s$ , 4 – внешний диаметр розетки  $D$  и 5 – угол конусности лопастей розетки  $\alpha$  (рис. 1); в качестве отклика – кратность пены  $K$ . Исходя из анализа известных эмпирических зависимостей кратности пены от геометрических параметров дужек и розетки оросителя, а также числа  $We$  [11; 12; 14], ПФЭ проводился на трех уровнях главных факторов, имеющих следующие значения:  $We = 23100, 47900$  и  $75900$ ,  $L = 30, 50$  и  $150$  мм,  $K_s = 50, 64$  и  $100$  %,  $D = 20, 50$  и  $100$  мм и  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$  и  $45^\circ$ . Выбор трех уровней факторов объясняется тем, что зависимости кратности пены от них не линейны, а имеют вид кривой, для описания которой необходимо как минимум три уровня. При количестве факторов  $n_f = 5$  и количестве уровней  $p_y = 3$  план ПФЭ состоит из 243 серий опытов. С целью

<sup>1</sup> Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. – Введ. 12.07.16. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2016. – 18 с.

уменьшения погрешности измерений с каждой конфигурацией, выбранной случайным образом, проводилось пять экспериментов.

Анализ ПФЭ с целью исключения возможности ошибки при расчетах, а также для наглядности полученных результатов проводился с помощью программного обеспечения STATISTICA компании StatSoft, Inc. (США). Система STATISTICA является одним из наиболее известных в мировой практике пакетов статистического анализа и обработки данных и широко применяется в крупнейших университетах, исследовательских центрах, банках, государственных учреждениях и др. [13].

На основании анализа ПФЭ возможно построение регрессионных моделей трех типов. Это модель: 1) включающая главные факторы и квадраты главных факторов, но без учета их взаимодействий; 2) включающая главные факторы и их квадраты с учетом взаимодействий главных факторов; 3) включающая главные факторы и квадраты главных факторов, а также учитывающая взаимодействия главных факторов и их квадратов. Выбор типа модели, как правило, осуществлялся с учетом коэффициента детерминации  $R^2$ , который показывает долю изменяемости отклика, происходящей при одновременном воздействии всех включенных в модель факторов. Чем больше значение данного коэффициента ( $0 \leq R^2 \leq 1$ ), тем выше качество модели (точность описания взаимосвязи между факторами и откликом). Так, для модели первого типа коэффициент детерминации оказался равным  $R^2 = 0,83$ , для модели второго типа –  $R^2 = 0,93$  и для модели третьего типа –  $R^2 = 0,95$ . В связи с тем что коэффициент детерминации для второго и третьего типа модели отличается всего на 0,02, для анализа выбрана более простая модель, включающая главные факторы и их квадраты с учетом взаимодействий главных факторов. Такая модель в натуральном масштабе переменных имеет следующий вид:

$$K = b_0 + b_1 We + b_2 We^2 + b_3 L + b_4 L^2 + b_5 K_s + b_6 K_s^2 + b_7 D + b_8 D^2 + b_9 \alpha + b_{10} \alpha^2 + b_{11} We L + b_{12} We K_s + b_{13} We D + b_{14} We \alpha + b_{15} L K_s + b_{16} L D + b_{17} L \alpha + b_{18} K_s D + b_{19} K_s \alpha + b_{20} D \alpha. \quad (1)$$

где  $b_0, b_1, b_2, \dots$  – коэффициенты уравнения регрессии в натуральном масштабе переменных. Данные коэффициенты имеют размерность, обратную размерности переменных (или произведению переменных) при них.

Далее выполнен дисперсионный анализ данной модели, который в программной среде STATISTICA носит название ANOVA (от англ. Analysis of Variation). Выходные данные дисперсионного анализа представлены в таблице 1. Следует отметить, что в первую очередь дисперсионный анализ позволяет отсеять незначимые факторы ( $p > 0,05$ ). Исходя из полученных данных такими факторами являются:  $We^2$ ;  $K_s$ ;  $\alpha^2$ ;  $We \times D$ ;  $We \times \alpha$ ;  $K_s \times \alpha$ .

После исключения незначимых факторов рассматриваемая модель приобрела следующий вид:

$$K = b_0 + b_1 We + b_2 L + b_3 L^2 + b_4 K_s^2 + b_5 D + b_6 D^2 + b_7 \alpha + b_8 We L + b_9 We K_s + b_{10} L K_s + b_{11} L D + b_{12} L \alpha + b_{13} K_s D + b_{14} D \alpha. \quad (2)$$

Выходные данные дисперсионного анализа уточненной модели (2) представлены в таблице 1 (без учета незначимых факторов). Новая модель имеет значение коэффициента детерминации  $R^2$ , близкое к 1 ( $\approx 0,93$ ), что свидетельствует о высокой точности описания взаимосвязи факторов с зависимой переменной.

Сумма квадратов отклонений каждого фактора характеризует изменчивость отклика, объясняемую данным фактором, т.е. влияние данного фактора на кратность пены. Исходя из полученных данных следует, что наибольшая изменчивость отклика объясняется факторами  $L$  (43 % от общей суммы квадратов отклонений) и  $We$  (37 %). Влияние остальных факторов на зависимую переменную существенно меньше (не более 10 %).

Таблица 1. – Результаты дисперсионного анализа с учетом незначимых факторов и без их учета

Фактор	С учетом незначимых факторов		Без учета незначимых факторов	
	Сумма квадратов отклонений	Уровень статистической значимости	Сумма квадратов отклонений	Уровень статистической значимости
<b>We</b>	<b>159,6114</b>	<b>0,000000</b>	162,3269	0,000000
We <sup>2</sup>	0,4845	0,059911	исключен	
<b>L</b>	<b>189,2959</b>	<b>0,000000</b>	190,0724	0,000000
<b>L<sup>2</sup></b>	<b>18,0121</b>	<b>0,000000</b>	18,0121	0,000000
K <sub>s</sub>	0,2308	0,193208	исключен	
<b>K<sub>s</sub><sup>2</sup></b>	<b>3,5436</b>	<b>0,000001</b>	4,2263	0,000000
<b>D</b>	<b>3,7724</b>	<b>0,000000</b>	3,8197	0,000000
<b>D<sup>2</sup></b>	<b>8,9538</b>	<b>0,000000</b>	8,9538	0,000000
<b>α</b>	<b>8,2261</b>	<b>0,000000</b>	7,8970	0,000000
α <sup>2</sup>	0,0000	0,988214	исключен	
<b>We×L</b>	<b>1,8119</b>	<b>0,000318</b>	1,8119	0,000337
<b>We×K<sub>s</sub></b>	<b>0,8325</b>	<b>0,013922</b>	0,8128	0,015521
We×D	0,0275	0,652469	исключен	
We×α	0,0343	0,615432	исключен	
<b>L×K<sub>s</sub></b>	<b>18,6432</b>	<b>0,000000</b>	20,8216	0,000000
<b>L×D</b>	<b>21,4789</b>	<b>0,000000</b>	21,4789	0,000000
<b>L×α</b>	<b>1,4063</b>	<b>0,001464</b>	1,4063	0,001532
<b>K<sub>s</sub>×D</b>	<b>0,8258</b>	<b>0,014304</b>	0,9187	0,010147
K <sub>s</sub> ×α	0,3167	0,127714	исключен	
<b>D×α</b>	<b>0,8222</b>	<b>0,014518</b>	0,8222	0,014941
Общая сумма квадратов отклонений	438,0091		438,0091	

Затем проведен регрессионный анализ уточненной модели. В первую очередь выполнена проверка наличия мультиколлинеарных факторов, т.е. факторов, между которыми имеется сильная корреляционная связь (коэффициент корреляции  $|r| \geq 0,75$ ) [13]. Поиск таких факторов необходим по той причине, что они затрудняют ранжирование всех факторов по степени влияния на отклик. Для этого построена корреляционная матрица, при анализе которой установлено, что нет ни одного коэффициента, превышающего значение 0,75, при этом наиболее высокий из них имеет абсолютную величину 0,36. В связи с этим можно заключить, что сильной корреляционной связи между факторами нет, поэтому при использовании уточненной модели (2) можно достаточно точно ранжировать факторы по степени их влияния на отклик. При анализе корреляционной матрицы следует также отметить факторы, которые имеют наибольшую степень корреляции с откликом «Кратность  $K$ ». Так, умеренная корреляционная связь ( $0,25 < |r| \leq 0,75$ ) наблюдается между откликом и факторами We ( $|r| = 0,63$ ) и L ( $|r| = 0,58$ ).

Следующим этапом регрессионного анализа явился анализ остатков. Под остатками подразумеваются разности между экспериментальными значениями отклика и их предсказанными значениями по модели. Модель можно считать достаточно точной, если остатки не зависят от предсказанных по модели значений зависимой переменной. Для проверки данного условия построена диаграмма рассеяния остатков в зависимости от предсказанного по модели значения зависимой переменной (рис. 3). Исходя из результатов на данной диаграмме следует отметить, что систематическая зависимость величины остатков от предсказанных значений отклика не наблюдается.

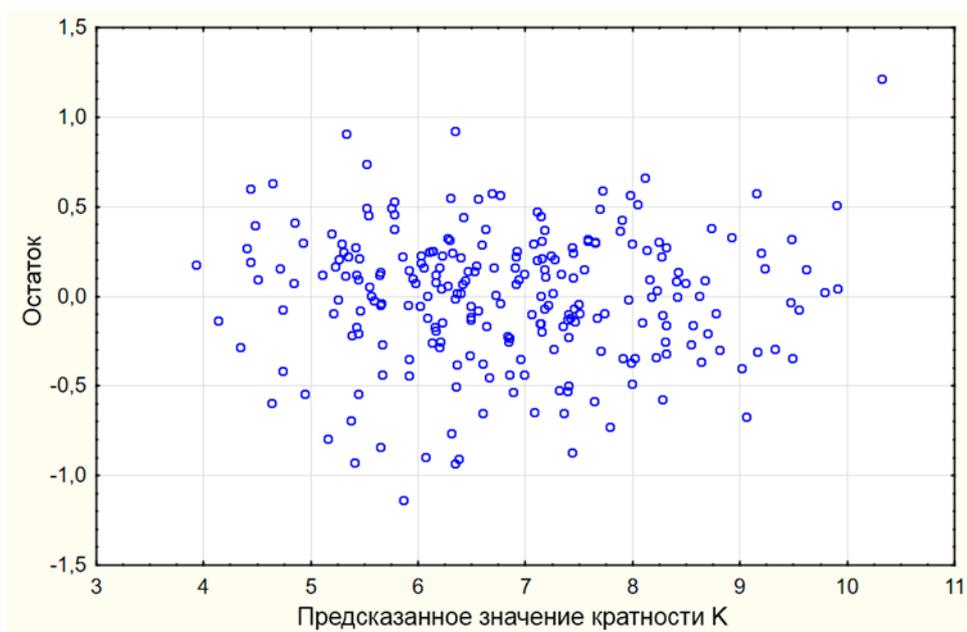


Рисунок 3. – Диаграмма рассеяния остатков

Для определения количественного влияния факторов на изменение кратности пены проведена оценка эффектов, являющихся разностями средних значений зависимой переменной при минимальных и максимальных абсолютных значениях главных факторов в рамках их исследуемых диапазонов, результаты которой представлены в таблице 2. Следует отметить, что наибольшим эффектом обладают факторы, которые по результатам дисперсионного анализа характеризовали наибольшую степень изменчивости зависимой переменной, а именно:  $We$  ( $\Delta K = 2,09$ ) и  $L$  ( $\Delta K = 2,20$ ).

Таблица 2. – Результаты оценки эффектов факторов

Фактор	Эффект $\Delta K$	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	Уровень значимости	Доверительный интервал	
					Нижний	Верхний
$b_0$	7,086150	0,024715	286,7118	0,000000	7,037450	7,134849
$We$	2,093493	0,060753	34,4590	0,000000	1,973783	2,213202
$L$	2,203234	0,059087	37,2878	0,000000	2,086807	2,319661
$L^2$	0,618848	0,053913	11,4786	0,000000	0,512616	0,725080
$K_s^2$	0,280354	0,050422	5,5602	0,000000	0,181001	0,379707
$D$	0,321013	0,060730	5,2859	0,000000	0,201350	0,440676
$D^2$	0,411420	0,050836	8,0930	0,000000	0,311251	0,511589
$\alpha$	0,457774	0,060230	7,6004	0,000000	0,339095	0,576453
$We \times L$	0,241616	0,066366	3,6406	0,000337	0,110846	0,372385
$We \times K_s$	-0,168011	0,068905	-2,4383	0,015521	-0,303783	-0,032240
$L \times K_s$	0,771515	0,062514	12,3414	0,000000	0,648335	0,894695
$L \times D$	0,823849	0,065726	12,5347	0,000000	0,694342	0,953356
$L \times \alpha$	0,212993	0,066407	3,2074	0,001532	0,082143	0,343842
$K_s \times D$	0,176158	0,067952	2,5924	0,010147	0,042264	0,310052
$D \times \alpha$	0,172714	0,070426	2,4524	0,014941	0,033944	0,311483

Таким образом, на основании проведенного дисперсионного и регрессионного анализов модели, построенной по результатам ПФЭ, можно заключить, что наибольшее изменение  $K$  наблюдается при варьировании следующих факторов: число  $We$  и длина дужек  $L$ .

Конечный вид разработанной регрессионной модели в натуральном масштабе переменных для прогнозирования кратности пены, генерируемой с использованием пенообразователя Синтек-6НС (6 %), в зависимости от исследуемых факторов в установленных диапазонах их значений следующий:

$$\begin{aligned}
K &= b_0 + b_1 We + b_2 L + b_3 L^2 + b_4 K_s^2 + b_5 D + b_6 D^2 + b_7 \alpha + b_8 We L + \\
&\quad + b_9 We K_s + b_{10} L K_s + b_{11} L D + b_{12} L \alpha + b_{13} K_s D + b_{14} D \alpha = \\
&= 3,4 + 0,00004 We + 0,03708 L - 0,00031 L^2 - 0,00018 K_s^2 + 0,00985 D - \\
&\quad - 0,00027 D^2 - 0,00403 \alpha + 0,000000076 We L - 0,0000001 We K_s + \\
&\quad + 0,00026 L K_s + 0,00017 L D + 0,00012 L \alpha + 0,000098 K_s D + 0,00014 D \alpha.
\end{aligned} \tag{3}$$

В формуле 3 коэффициенты уравнения регрессии  $b_i$  и  $b_{ij}$  установлены согласно оценкам регрессионных коэффициентов, которые представлены в таблице 3 и имеют размерность, обратную размерности переменных (или произведению переменных) при них.

**Таблица 3. – Оценка коэффициентов уравнения регрессии**

Фактор	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента	Уровень значимости	Доверительный интервал	
					Нижний	Верхний
$b_0$	3,401672	0,299322	11,3646	0,000000	2,811881	3,991463
We	0,000040	0 000004	9,5004	0,000000	0,000032	0,000049
L	0,037081	0,005660	6,5509	0,000000	0,025928	0,048235
$L^2$	-0,000309	0,000028	-11,2291	0,000000	-0,000364	-0,000255
$K_s^2$	-0,000178	0,000025	-7,2656	0,000000	-0,000227	-0,000130
D	0,009850	0,005405	1,8224	0,069703	-0,000800	0,020499
$D^2$	-0,000274	0,000035	-7,9172	0,000000	-0,000343	-0,000206
$\alpha$	-0,004026	0,004882	-0,8247	0,410418	-0,013646	0,005594
We×L	0,000000	0,000000	3,5615	0,000449	0,000000	0,000000
We× $K_s$	-0,000000	0,000000	-1,9042	0,058147	-0,000000	0,000000
L× $K_s$	0,000258	0,000022	11,8289	0,000000	0,000215	0,000301
L×D	0,000172	0,000014	12,2623	0,000000	0,000144	0,000199
L× $\alpha$	0,000118	0 000038	3,1377	0,001927	0,000044	0,000193
$K_s$ ×D	0,000098	0,000035	2,8285	0,005093	0,000030	0,000166
D× $\alpha$	0,000144	0,000060	2,3991	0,017239	0,000026	0,000262

Подстановка различных комбинаций факторов ( $L$ ,  $K_s$ ,  $D$  и  $\alpha$ ), для которых известны экспериментальные значения  $K$ , в формулу (3) приводит к результатам, отличающимся от экспериментальных не более чем на 8,9 %. Данный факт свидетельствует о возможности созданной модели с достаточно высокой точностью предсказывать значения зависимой переменной (кратности пены) в установленных диапазонах изменения числа We и геометрических параметров дужек и розетки оросителя ( $We = 23100–75900$ ,  $L = 30–150$  мм,  $K_s = 50–100$  %,  $D = 20–100$  мм и  $\alpha = 15–45^\circ$ ).

Для удобства на практике прогнозировать кратность пены можно с помощью регрессионной модели, включающей главные факторы и квадраты главных факторов, но без учета их взаимодействий, которая имеет коэффициент детерминации  $R^2 = 0,82$ :

$$\begin{aligned}
K &= -0,70 + 0,00004 We + 0,0725 L - 0,00031 L^2 + 0,07355 K_s - \\
&\quad - 0,00052 K_s^2 - 0,000003 D^2 + 0,0132 \alpha.
\end{aligned} \tag{4}$$

### Заключение

Согласно разработанному плану полного факторного эксперимента выполнено определение кратности пены, получаемой с помощью розеточного оросителя при использовании рабочего водного раствора синтетического углеводородного пенообразователя, не содержащего фторированные поверхностно-активные вещества, марки Синтек-6НС (6 %) в зависимости от следующих параметров: числа Вебера ( $We$ ), длины дужек оросителя ( $L$ ), коэффициента рабочей поверхности ( $K_s$ ), внешнего диаметра ( $D$ ) и угла конусности лопастей ( $\alpha$ ) розетки. Полный факторный эксперимент проводился на трех уровнях вышепере-

численных параметров (факторов):  $We = 23\ 100, 47\ 900$  и  $75\ 900$ ,  $L = 30, 50$  и  $150$  мм,  $K_s = 50, 64$  и  $100\ %$ ,  $D = 20, 50$  и  $100$  мм и  $\alpha = 15, 30$  и  $45^\circ$  и состоял из 243 серий опытов.

На основе анализа результатов полного факторного эксперимента построена регрессионная модель (3) для прогнозирования кратности пены в зависимости от вышеуказанных параметров в следующих диапазонах значений:  $We = 23\ 100\text{--}75\ 900$ ,  $L = 30\text{--}150$  мм,  $K_s = 50\text{--}100\ %$ ,  $D = 20\text{--}100$  мм и  $\alpha = 15\text{--}45^\circ$ . Отклонение теоретических значений кратности пены, определяемых с помощью разработанной модели, по сравнению с эмпирическими данными составляет не более 8,9 %. Для полученной модели коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,93, что свидетельствует о высокой точности описания зависимой переменной (кратности пены) от исследованных факторов. Разработанная модель может быть использована для прогнозирования кратности пены, получаемой с использованием рабочего водного раствора синтетических углеводородных пенообразователей, не содержащих фторированные поверхностно-активные вещества, в частности пенообразователя Синтек-6НС (6 %).

При дисперсионном анализе модели установлено, что наибольшее влияние на кратность пены оказывают такие параметры, как длина дужек  $L$  и число  $We$  (43 и 37 % соответственно от общей суммы квадратов отклонений). При регрессионном анализе установлено, что сильной корреляционной связи между факторами нет (ни один коэффициент не превышает значение 0,75), поэтому при использовании модели можно достаточно точно ранжировать факторы по степени их влияния на отклик. Наибольшая корреляционная связь наблюдается между откликом и факторами «число  $We$ » ( $|r| = 0,63$ ) и «длина дужек  $L$ » ( $|r| = 0,58$ ).

В полученной регрессионной модели (3), в отличие от модели согласно [8], помимо геометрических параметров дужек и розетки оросителя учитывается число Вебера  $We$ , которое определяют гидродинамические параметры струи водного раствора пенообразователя. Вместе с тем в текущей работе исследования проводились с использованием пенообразователя аналогичного типа и сходного по химическому составу и свойствам (по сравнению с работой [8]), но другой марки (Синтек-6НС (6 %) вместо ПО-6РЗ (6 %)). Дальнейшие исследования с использованием различных типов и марок пенообразователей позволят получить универсальную модель прогнозирования кратности пены, учитывающую физико-химические свойства используемого пенообразователя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т22М-023).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ahrens, M. U.S. Experience with sprinklers / M. Ahrens. – Quincy: NFPA Research, 2017. – 35 p.
2. Chen, T. Experimental study on the extinguishing efficiency of compressed air foam sprinkler system on oil pool fire / T. Chen [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2018. – Vol. 211. – P. 94–103. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.142.
3. Dlugogorski, B.Z. What properties matters in fire-fighting foams?: whitepaper / B.Z. Dlugogorski [et al.]. – Tokyo, 2002. – 20 p.
4. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 224 с.
5. Качанов, И.В. Установки автоматического пожаротушения с предварительной аэрацией огнетушащей рабочей среды / И.В. Качанов, И.В. Карпенчук, С.Ю. Павлюков. – Минск: БНТУ, 2018. – 148 с.
6. Кучер, В.М. Изучение процессов тушения пламени нефтепродуктов низкократными пенами / В.М. Кучер [и др.] // *Пожаротушение: сб. науч. тр. / ВНИИПО*. – М.: ВНИИПО, 1984. – С. 29–37.
7. Laundess, A.J. Small-scale test protocol for firefighting foams DEF(AUST)5706: effect of bubble size distribution and expansion ratio / A.J. Laundess [et al.] // *Fire Technology*. – 2011. – Vol. 47. – P. 149–162. – DOI: 10.1007/s10694-009-0136-2.

8. Kamluk, A.N. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov // *Fire Safety Journal*. – 2019. – Vol. 109. – Article 102862. – 8 p. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102862.
9. Kamluk, A.N. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers / A.N. Kamluk, A.O. Likhomanov, A.V. Grachulin // *Fire Safety Journal*. – 2020. – Vol. 116. – Article 103177. – 10 p. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103177.
10. Лихоманов, А.О. О взаимосвязях геометрических параметров оросителя, устойчивости и кратности получаемой пены / А.О. Лихоманов, Э.Г. Говор, А.Н. Камлюк // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 174–185. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.159. – EDN: ZKVVOJ.
11. Лихоманов, А.О. Длина начального участка осесимметричной турбулентной струи, образующейся в пенном розеточном оросителе для автоматических установок пожаротушения / А.О. Лихоманов, А.Н. Камлюк // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 159–173. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.159. – EDN: ZRNKUV.
12. Говор, Э.Г. Экспериментальное исследование геометрических параметров штуцера оросителя и их влияние на гидродинамические параметры струи водных растворов различных пенообразователей / Э.Г. Говор, Т.А. Говор, А.О. Лихоманов // *Пожарная и аварийная безопасность: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 90-й годовщине образования гражданской обороны, 24 ноября 2022 г.* – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 315–321.
13. Халафян, А.А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA: учеб. пособие / А.А. Халафян. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 384 с.
14. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2023. – 244 с.

**Влияние гидродинамических параметров струи и геометрических параметров дужек и розетки оросителя на кратность пены**

**Influence of hydrodynamic parameters of the jet and geometric parameters of the frame arm and deflector of the sprinkler on foam expansion rate**

***Говор Эдуард Геннадьевич***

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», отдел научной и инновационной деятельности, научный сотрудник

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

Email: govor-098@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4040-3264

***Eduard G. Govor***

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Department of Scientific and Innovation Activity, Researcher

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

Email: govor-098@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4040-3264

***Лихоманов Алексей Олегович***

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

ORCID: 0000-0002-9374-1486

***Aleksey O. Likhomanov***

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

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

Email: alexlikh20@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9374-1486

***Камлюк Андрей Николаевич***

кандидат физико-математических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», заместитель начальника университета по научной и инновационной деятельности

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

***Andrey N. Kamlyuk***

PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Deputy Chief of the University on Scientific and Innovative Activity

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

Email: kan@ucp.by

ORCID: 0000-0002-9347-0778

***Говор Татьяна Алексеевна***

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», факультет подготовки руководящих кадров, магистрант

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

Email: kalinskaja1@mail.ru

ORCID: 0009-0002-7927-8971

***Tatyana A. Govor***

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Administration Training Faculty, graduate student

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

Email: kalinskaja1@mail.ru

ORCID: 0009-0002-7927-8971

**Ярец Владимир Алексеевич**

Филиал «Институт профессионального образования» государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра профессиональной подготовки, преподаватель

Адрес: пр-т Речицкий, 35А,  
246023, Гомель, Беларусь

Email: v-yarets@mail.ru

ORCID: 0009-0004-9637-2235

**Vladimir A. Yarets**

Branch «Institute of Vocational Education» of the State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Professional Training, Lecturer

Address: Rechitskiy ave., 35A,  
246023, Gomel, Belarus

Email: v-yarets@mail.ru

ORCID: 0009-0004-9637-2235

## INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE JET AND GEOMETRIC PARAMETERS OF THE FRAME ARM AND DEFLECTOR OF THE SPRINKLER ON FOAM EXPANSION RATE

**Govor E.G., Likhomanov A.O., Govor T.A., Kamlyuk A.N., Yarets V.A.**

*Purpose.* To determine the dependence of the expansion rate of air-mechanical foam on the hydrodynamic parameters of the jet of an aqueous solution of a synthetic hydrocarbon foaming agent that does not contain fluorinated surfactants, taking into account the variation in the geometric parameters of the elements of the deflector type sprinkler (nozzle, frame arm and deflector).

*Methods.* The theoretical methods of analysis, comparison and synthesis, as well as the method of a full factorial experiment to obtain a regression model were used.

*Findings.* The full factorial experiment on the three levels of five factors affecting the expansion rate of foam generated by the deflector type sprinkler was carried out. The three levels of the Weber number were equal to 23 100, 47 900 and 75 900 accordingly, the frame arm length  $L$  was 30, 50 and 150 mm, the deflector working surface coefficient  $K_s$  was 50, 64 и 100 %, the outer deflector diameter  $D$  was 20, 50 and 100 mm and the deflector taper angle  $\alpha$  was 15, 30 and 45°. To generate foam the synthetic hydrocarbon foaming agent Sintek-6NS (6 %), which does not contain fluorinated surfactants and belongs to the foaming agents of general purpose (type S) according to STB 2459-2016, was used. After the analysis of the obtained experimental data the regression model for predicting the foam expansion rate in the studied ranges of values of the Weber number and the geometrical parameters of frame arm and deflector of the sprinkler was developed. For the created model the coefficient of determination  $R^2$  is 0.93, which indicates a high accuracy of description of the dependent variable (foam expansion rate  $K$ ) from the studied factors, while the deviation of theoretical values of foam expansion rate from empirical ones does not exceed 8.9 %.

*Application field of research.* The developed regression model allows the selection of optimal configurations (combinations of geometric parameters) of the deflector type sprinkler, in particular the deflector working surface coefficient, the outer diameter and the taper angle of the deflector, the frame arm length and the diameter of the sprinkler nozzle to obtain foam with the required expansion rate, depending on the conditions and objectives of the application of the extinguishing agent.

*Keywords:* automatic extinguishing system, deflector type sprinkler, sprinkler frame arm, sprinkler deflector, nozzle diameter, jet hydrodynamic parameters, Weber number, air-mechanical foam, foam expansion rate, full factorial experiment.

(The date of submitting: April 7, 2023)

### REFERENCES

1. Ahrens M. U.S. Experience with sprinklers. Quincy: NFPA Research, 2017. 35 p.
2. Chen T., Fu X., Bao Zh., Xia J., Wang R. Experimental study on the extinguishing efficiency of compressed air foam sprinkler system on oil pool fire. *Procedia Engineering*, 2018. Vol. 211. Pp. 94–103. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.142.
3. Dlugogorski, B.Z. What properties matters in fire-fighting foams?: whitepaper / B.Z. Dlugogorski, E.M. Kennedy, T.H. Shaefer, J.A. Vitali. – Tokyo, 2002. – 20 p.
4. 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)
5. Kachanov I.V., Karpenchuk I.V., Pavlyukov S.Yu. *Ustanovki avtomaticheskogo pozharotusheniya s predvaritel'noy aeratsiey oagnetushashchey rabochey sredy* [Automatic fire extinguishing installations with preliminary aeration of the fire extinguishing working medium]. Minsk: BNTU, 2018. 148 p. (rus)
6. Kucher V.M., Merkulov V.A., Zhukov V.V., Kucher V.N., Ponimasov V.M. *Izuchenie protsessov tusheniya plameni nefteproduktov nizkokratnymi penami* [Study of the processes of extinguishing the oil products flame with low-expansion foams]. *Pozharotushenie: proceedings of VNIPO*. Moscow: VNIPO, 1984. Pp. 29–37. (rus)
7. 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. Pp. 149–162. DOI: 10.1007/s10694-009-0136-2.

8. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry. *Fire Safety Journal*, 2019. Vol. 109. Article 102862. 8 p. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102862.
9. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers. *Fire Safety Journal*, 2020. Vol. 116. Article 103177. 10 p. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103177.
10. Likhomanov A.O., Govor E.G., Kamlyuk A.N. О взаимосвязях геометрических параметров оросителя, устойчивости и кратности получаемой пены [On the relationship between the sprinkler geometric parameters, stability and expansion rate of the generated foam]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 2. Pp. 174–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.174. EDN: ZKVVOJ.
11. Лихоманов, А.О. Длина начального участка осесимметричной турбулентной струи, образующейся в пенном розеточном оросителе для автоматических установок пожаротушения [The breakup length of axisymmetric turbulent jet in the foam deflector type sprinkler for automatic extinguishing systems] *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 2. Pp. 159–173. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.159. EDN: ZRNKUV.
12. Govor E.G., Govor T.A., Likhomanov A.O. Eksperimental'noe issledovanie geometricheskikh parametrov shtutsera orosatelya i ikh vliyanie na gidrodinamicheskie parametry strui vodnykh rastvorov razlichnykh penoobrazovateley [Experimental study of the geometric parameters of the sprinkler nozzle and their influence on the hydrodynamic parameters of the jet of aqueous solutions of various foam concentrates]. *Proc. XVII Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 90th anniversary of the formation of civil defense «Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'»*, November 24, 2022. Ivanovo: Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2022. Pp. 315–321. (rus)
13. Khalafyan A.A. *Promyshlennaya statistika: kontrol' kachestva, analiz protsessov, planirovanie eksperimentov v pakete STATISTICA* [Industrial statistics: quality control, process analysis, experiment design in STATISTICA]. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013. 384 p. (rus)
14. 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)