

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЯЧЕЙКИ СЕТКИ И РАССТОЯНИЯ ОТ НЕЕ ДО СОПЛА ПЕНОГЕНЕРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ДИСПЕРСНОСТЬ ПЕНЫ

Камлюк А.Н., Лихоманов А.О., Титовец А.Ф., Полочанин Н.С., Грачулин А.В.

Цель. Экспериментально оценить влияние размеров ячейки сетки и расстояния от сопла до нее на дисперсность получаемой воздушно-механической пены. На основе полученных экспериментальных данных проверить адекватность теоретических расчетов диаметра пузырька, образующегося на затопленном и незатопленном отверстии.

Методы. В процессе выполнения работы применялись основные теоретические и эмпирические методы исследования. Для определения диаметра пузырьков пены применялся многофункциональный графический редактор GIMP.

Результаты. Получены эмпирические данные о диаметре пузырьков пены для следующих диапазонов значений переменных параметров: размер ячейки сетки – от 0,5×0,5 до 3,2×3,2 мм; скорость струи пенообразующего раствора на выходе из сопла – от 7 до 17 м/с; расстояние от выходного отверстия сопла до сетки – от 50 до 400 мм. Установлено, что на расстоянии от выходного отверстия сопла до сетки, равном 200 мм, средний диаметр пузырьков пены наиболее близок к теоретически рассчитанным значениям (отклонение не более 26 %, среднее отклонение 14 %).

Область применения исследований. Разработка устройств для генерирования воздушно-механической пены на сетках.

Ключевые слова: пена, диаметр пузырька, скорость выдувания пузырьков, дисперсность.

(Поступила в редакцию 5 октября 2022 г.)

Введение

Воздушно-механическая пена (далее – пена) для нужд пожаротушения представляет собой дисперсную систему, состоящую из пузырьков газа, разделенных пленками жидкости [1]. Дисперсность – это физическая величина, характеризующая размер взвешенных частиц в дисперсных системах, которую применительно к пенам можно оценить средним диаметром их пузырьков. Следует отметить, что дисперсность пены является одним из ключевых параметров, влияющих на ее огнетушащую эффективность [2]. При этом дисперсность тем выше, чем меньше средний диаметр пузырьков:

$$D = 1 / d_{п},$$

где D – дисперсность, $d_{п}$ – средний диаметр пузырьков пены.

Для определения дисперсности пены наиболее широкое распространение получил метод микрофотографирования пены, заключающийся в прямом определении размеров пузырьков. Из работы французских физиков [3] известно, что основными параметрами, которые могут влиять на диаметр пузырьков, являются размеры ячейки, на которой формируется мыльная пленка, диаметр поперечного сечения потока воздуха, а также скорость потока. Также на диаметр пузырька большое влияние оказывают физико-механические свойства раствора (поверхностное натяжение, вязкость, концентрация поверхностно-активных веществ). Влияние размеров ячеек сетки и скорости подачи раствора пенообразователя, а также расположения сетки в насадке пожарного ствола на кратность получаемой пены рассмотрено в работе [4]. Однако дисперсность пены в указанной работе не исследовалась.

В основу данной работы положена экспериментальная оценка диаметра пузырьков, получаемых при генерировании пены на сетке, а также проверка адекватности расчета диаметра пузырька, образующегося на затопленном и незатопленном отверстии, выполненного в работе [5].

Основная часть

Расчет среднего диаметра пузырька. В статье [3] показано, что для образования пузырьков необходимо достигнуть минимальную скорость выдувания v_{\min} . При этом каждому размеру ячейки сетки соответствует определенная минимальная скорость выдувания, которую можно рассчитать по формуле:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho a}}, \quad (1)$$

где a – линейный размер ячейки сетки;

ρ – плотность воздуха;

σ – поверхностное натяжение.

Далее при расчетах использовались следующие значения физических величин: $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 0,024 \text{ Н/м}$.

В соответствии с формулой (1) значения минимальной скорости выдувания для сеток с линейными размерами ячейки $0,5 \times 0,5$; $1,0 \times 1,0$; $3,2 \times 3,2$ мм приведены в таблице 1. В таблице также указаны значения скорости потока пенообразующего раствора v при проведении экспериментов и величина их отклонения от v_{\min} .

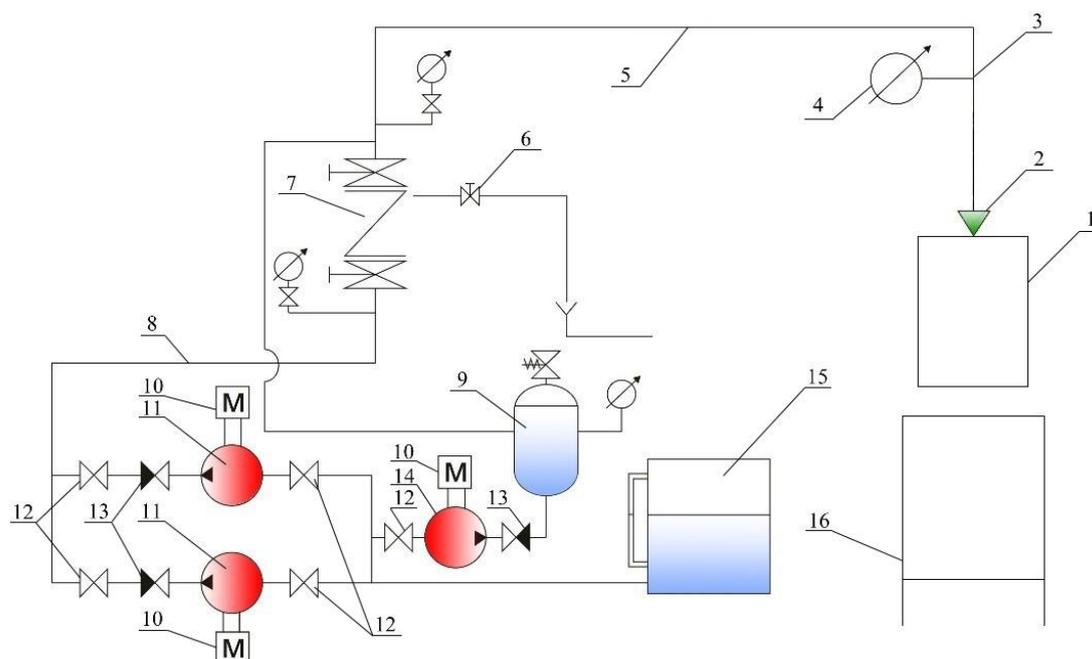
Таблица 1. – Минимальная (теоретическая) и экспериментальная скорости для получения пены на сетках с различными линейными размерами ячейки

Линейные размеры ячейки сетки, мм	Минимальная скорость выдувания пузырьков v_{\min} , м/с	Скорость потока пенообразующего раствора в экспериментах v , м/с	Отклонение v от v_{\min} , %
0,5 × 0,5	17,5	17	2,9
1,0 × 1,0	12,4	11	11,3
3,2 × 3,2	6,9	7	1,4

В ходе работы использовалась экспериментальная установка (рис. 1) [6; 7], состоящая из насосной станции, содержащей основной и резервный насосы 11 (Grundfos CR10-03 X-FN-A-E-HQQE, модель А 96689538, напор не менее 0,2 МПа, подача не менее 5 л/с) с электроприводом 10 (MG80С 2-19FT100-Н1, напряжение 220–240 В), регулирующих вентилей 12 на выходе и входе; обратных клапанов 13, подводящего трубопровода 8 диаметром 150 мм, клапана запорного универсального 7 (КЗУ-100), предназначенного для полного перекрытия (открывания) потока рабочей среды, питающего трубопровода 5, кранов ручного пуска 6, пневмобака 9 (PWGF80V type GT H-80V) с обратным клапаном 13 и насосом для поддержания давления в системе 14, предназначенного для повышения давления в системе до расчетного, тарированной емкости для раствора пенообразователя 15, распределительного трубопровода 3 диаметром 25 мм, за которым установлен экспериментальный образец сопла 2, а также манометр 4 для определения давления на входе. Подаваемый из емкости 15 по трубопроводам 6 %-й раствор пенообразователя из сопла 2 попадал на устройство к экспериментальной установке 1, затем образовавшаяся пена поступала в мерную емкость 16.

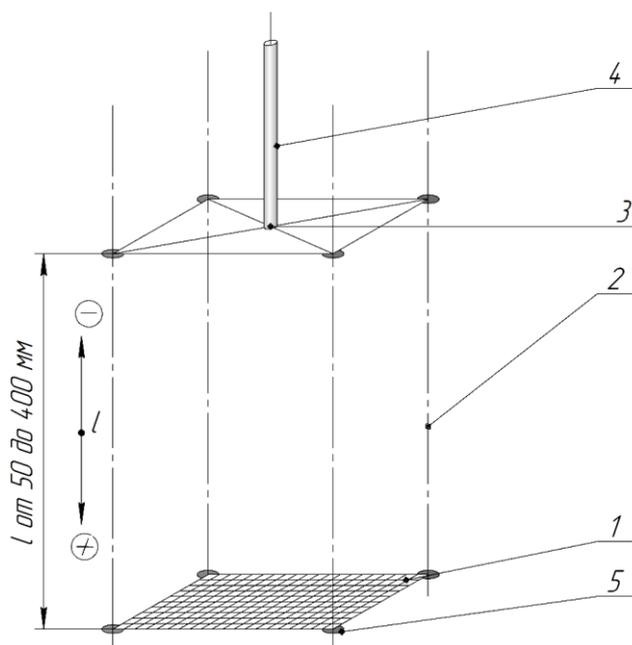
Устройство к экспериментальной установке (рис. 2) состоит из четырех металлических вертикальных ребер, на которых расположены фиксаторы, позволяющие регулировать расстояние от сопла до пеногенерирующей сетки. В нижней части устройства крепится сама сетка, а в верхней части находится держатель для закрепления устройства на трубопроводе экспериментальной установки. Благодаря держателям устройство оперативно может быть смонтировано (демонтировано) на экспериментальной установке.

В емкости 15 (рис. 1) находился предварительно приготовленный рабочий раствор пенообразователя Синтек-бНС (6 %), который в ходе экспериментов с помощью насосов 11 подавался на сетку с необходимой скоростью (табл. 1).



1 – устройство к экспериментальной установке; 2 – сопло; 3 – распределительный трубопровод; 4 – манометр; 5 – питающий трубопровод; 6 – кран ручного пуска; 7 – клапан запорный универсальный; 8 – подводящий трубопровод; 9 – пневмобак; 10 – электроприводы насосов; 11 – основной и резервный насосы; 12 – регулирующие вентили; 13 – обратный клапан; 14 – жокей-насос; 15 – емкость для раствора пенообразователя; 16 – мерная емкость

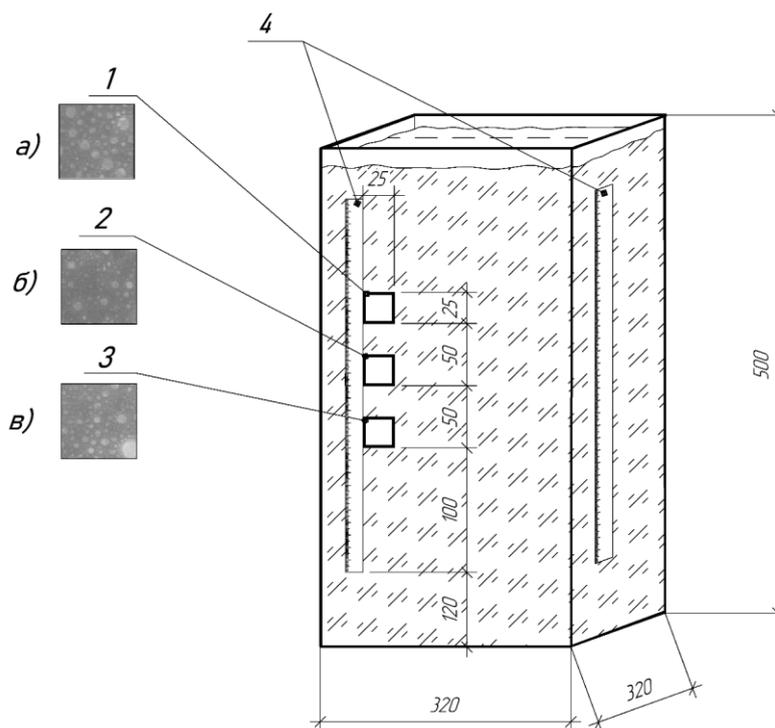
Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки для исследования диаметра пузырьков воздушно-механической пены



1 – сетка; 2 – металлические вертикальные ребра; 3 – держатель; 4 – трубопровод; 5 – фиксатор

Рисунок 2. – Устройство к экспериментальной установке

Под сеткой располагалась мерная емкость объемом 50 л (рис. 3). После заполнения емкости насосы выключались, тем самым прекращался процесс пенообразования. Далее проводилось фотографирование емкости с двух взаимно перпендикулярных сторон, на каждой из которых находилась измерительная линейка для масштабирования фотографий и последующего измерения диаметра пузырьков. Фотосъемка проводилась в проходящем свете при последующем увеличении фотографии в 10 раз.



1 – верхняя зона; 2 – средняя зона; 3 – нижняя зона; 4 – линейка
Рисунок 3. – Схема мерной емкости для забора пены

Измерение среднего диаметра пузырька проводилось в емкости в трех зонах (верхней, средней, нижней), каждая из которых представляла собой квадрат со стороной 25 мм (рис. 3). Нижние границы данных зон располагались на расстоянии 100, 150 и 200 мм от нулевой отметки измерительных линеек по вертикали, а сами линейки фиксировались на наружной поверхности мерной емкости на расстоянии 120 мм от дна мерной емкости для исключения попадания в область фотографирования жидкой фазы разрушившейся пены. Затем при использовании многофункционального графического редактора GIMP проводилось измерение диаметра пузырьков с помощью линейного отрезка с заданным масштабом по фотографиям, сделанным в каждой зоне (верхней, средней, нижней) с двух взаимно перпендикулярных сторон. Далее выполнялся расчет среднего диаметра пузырьков $d_{п}$, находящихся в каждой зоне. Примеры измерений по фотографиям в редакторе GIMP представлены на рисунке 4.

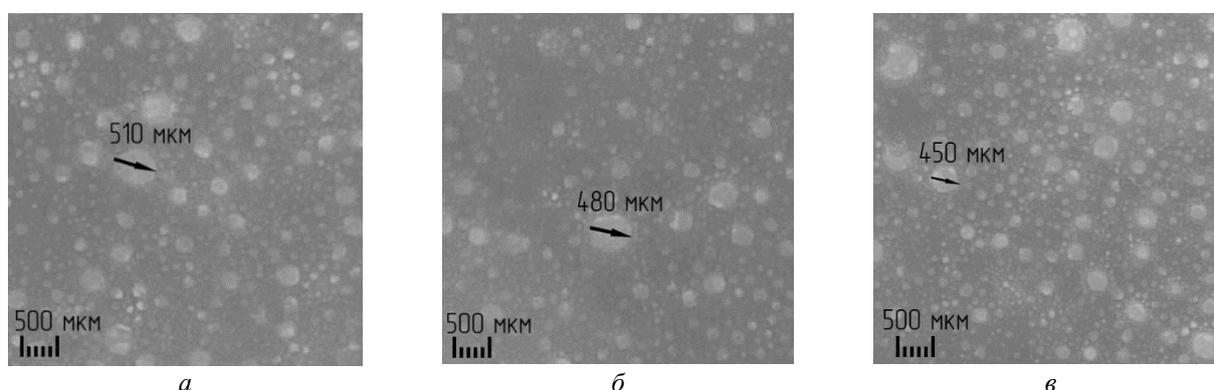


Рисунок 4. – Примеры измерений диаметра пузырька в каждой зоне (а, б, в – верхняя, средняя и нижняя зоны измерений соответственно)

Эксперименты проводились последовательно с сетками с линейными размерами ячейки $0,5 \times 0,5$; $1,0 \times 1,0$ и $3,2 \times 3,2$ мм с фиксированной для каждого вида скоростью

потока раствора пенообразователя v (17, 11 и 7 м/с соответственно) и при установке самой сетки на расстоянии $l = 400, 200, 100$ и 50 мм от выходного отверстия сопла на конце трубопровода экспериментальной установки. Фотографирование проводилось спустя 20 с после прекращения подачи пены. Полученные экспериментальные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Средний диаметр пузырьков пены, получаемой на сетках с различным линейным размером ячейки

Линейные размеры ячейки сетки, мм	0,5 × 0,5	1,0 × 1,0	3,2 × 3,2
	d_n , мм		
	$l = 400$ мм		
Верхняя зона	1,15	1,93	2,10
Средняя зона	1,45	1,50	2,43
Нижняя зона	1,43	1,80	2,10
Среднее по трем зонам	1,34	1,74	2,21
	$l = 200$ мм		
Верхняя зона	1,80	1,70	2,76
Средняя зона	1,62	2,50	3,04
Нижняя зона	1,73	1,40	2,36
Среднее по трем зонам	1,71	1,87	2,72
	$l = 100$ мм		
Верхняя зона	1,57	2,53	2,30
Средняя зона	1,17	1,50	2,43
Нижняя зона	1,09	2,38	2,32
Среднее по трем зонам	1,27	2,14	2,35
	$l = 50$ мм		
Верхняя зона	1,60	1,73	2,17
Средняя зона	1,58	1,89	2,00
Нижняя зона	1,37	1,55	2,34
Среднее по трем зонам	1,52	1,72	2,17

Теоретически определенные значения диаметра пузырьков пены на затопленном и незатопленном отверстии согласно статье [5] приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты теоретического расчета диаметра пузырьков пены для сеток с различным размером ячеек [5]

Размеры ячейки сетки, мм	0,5 × 0,5	1,0 × 1,0	3,2 × 3,2
d_n , мм:			
– на затопленном отверстии	2,00	2,50	3,80
– на незатопленном отверстии	0,60	1,20	3,60

С учетом того что при получении пены часть пузырьков формируется на сетке (т.е. на незатопленном отверстии), а часть в объеме пены внутри мерной емкости (случай затопленного отверстия), экспериментальные значения d_n следует ожидать внутри диапазона между значениями, приведенными в таблице 3 для каждого размера ячейки сетки соответственно. Здесь следует пояснить, что после заполнения мерной емкости (рис. 3) и прекращения подачи пены в нее образование пузырьков не заканчивается, а происходит в объеме самой пены по следующему алгоритму: толщина пленок пенообразующего раствора постепенно уменьшается за счет стекания жидкой фазы под действием силы тяжести, что приводит к разрушению части пузырьков пены. При этом происходит перетекание газа, заключенного в этих пузырьках, в объем пены, тем самым образуются новые пузырьки и (или) увеличивается размер уже существующих пузырьков. В качестве допущения принимаем, что скорость перетекания газа равна скорости выдувания пузырьков на сетке. Таким образом, образование пузырьков в объеме пены рассматривается как случай затопленного отверстия.

По результатам измерений, приведенным в таблице 2, видно, что средний диаметр пузырьков пены, получившихся на сетке с размерами ячейки $0,5 \times 0,5$ мм и $1,0 \times 1,0$ мм, действительно попадает в диапазоны расчетных значений согласно таблице 3.

Следует отметить, что теоретическая максимальная дисперсность у той пены, которая получена на сетке с размерами ячейки $0,5 \times 0,5$ мм принимает значения $D_{\text{теор}} = 0,50\text{--}1,67$ мм⁻¹ (нижний предел диапазона определен с использованием $d_{\text{п}}$ для случая затопленного отверстия (табл. 3), а верхний – для незатопленного отверстия соответственно), а на практике $D_{\text{практ}} = 0,75; 0,58; 0,79$ и $0,66$ мм⁻¹ при расстоянии $l = 400, 200, 100$ и 50 мм соответственно.

В ходе экспериментов явно не установлена зависимость среднего диаметра получаемых пузырьков пены, а соответственно, и дисперсности самой пены, от расстояния l , на котором располагалось сопло для подачи раствора пенообразователя по отношению к сетке. Вместе с тем можно отметить, что наименьшее отклонение результатов измерений от теоретических расчетов наблюдается при расстоянии от сопла до сетки $l = 200$ мм (не более 26 %, среднее отклонение 14 %), а наименее точным является случай, когда расстояние от сопла до сетки составляло $l = 50$ мм и размеры ячейки сетки были равны $3,2 \times 3,2$ мм (наибольшее отклонение 41 %). Для анализа случая с наибольшим отклонением экспериментального результата от теоретического на рисунке 5 представлена гистограмма распределения пузырьков пены. Из гистограммы видно, что более 50 % пузырьков имеют диаметр от 2,0 до 2,5 мм, а пузырьков с диаметром более 3,2 мм меньше 2 %.



Рисунок 5. – Гистограмма распределения пузырьков пены для случая с наибольшим отклонением экспериментального результата от теоретического (при размерах ячейки сетки $3,2 \times 3,2$ мм и расстоянии $l = 50$ мм)

Можно выделить несколько основных причин отклонения теоретических и экспериментальных данных (до 41 %), полученных при использовании сетки с размерами ячейки $3,2 \times 3,2$ мм:

1) эксперименты проводились в разные дни на протяжении трех месяцев (июль – сентябрь). Значения влажности и температуры колебались в диапазонах от 40 до 60 % и от 17 до 28 °С соответственно, что могло повлиять на устойчивость пены;

2) фотографирование каждой зоны мерной емкости проводилось спустя 20 с после прекращения подачи пены. За это время часть наиболее крупных пузырьков разрушалась, что в итоге могло существенно повлиять на значение среднего диаметра.

С целью исключения выявленных негативных факторов экспериментальные исследования по определению среднего диаметра пузырьков пены следует проводить строго

в одинаковых условиях (влажность и температура в помещении), а также сократить время фотографирования до 10 с и проводить фотосъемку при увеличении более чем в 10 раз.

Заключение

В результате экспериментальных исследований процесса генерирования воздушно-механической пены на сетке с использованием многофункционального графического редактора GIMP получены данные о диаметре пузырьков пены для следующих диапазонов значений переменных параметров: размер ячейки сетки – от $0,5 \times 0,5$ до $3,2 \times 3,2$ мм; скорость струи пенообразующего раствора на выходе из сопла – от 7 до 17 м/с; расстояние от выходного отверстия сопла до сетки – от 50 до 400 мм. Показано, что средний диаметр пузырьков пены, образовавшихся на сетке с размерами ячейки $0,5 \times 0,5$ мм и $1,0 \times 1,0$ мм при различном расстоянии от нее до сопла в достаточной степени соответствует теоретическим значениям, рассчитанным по ранее предложенному авторами [5] методу, основанному на балансе сил в момент отрыва пузырька при его росте на затопленном отверстии в условно покоящейся жидкости, а также на незатопленном отверстии. Наибольшее совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными наблюдается при генерировании пены на сетке, расположенной на расстоянии $l = 200$ мм от сопла (отклонение значений среднего диаметра пузырьков не более 26 %, а среднее отклонение – 14 %).

Вместе с тем следует отметить, что с помощью теоретического метода наименее точно описывается случай, когда расстояние от сопла до сетки составляет $l = 50$ мм и размеры ячейки сетки равны $3,2 \times 3,2$ мм (отклонение до 41 %). Авторами работы отмечается, что причиной этому может являться методика проведения эксперимента, которая должна быть усовершенствована. В частности, экспериментальные исследования по определению среднего диаметра пузырьков пены следует проводить строго в одинаковых условиях (влажность и температура в помещении), а также необходимо сократить время фотографирования до 10 с и проводить фотосъемку при увеличении более чем в 10 раз. Таким образом, для верификации теоретического метода, предложенного в работе [5], требуется проведение дополнительных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров, В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В.К. Тихомиров. – М.: Химия, 1975. – 263 с.
2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, – 2019. – 224 с.
3. Salkin, L. Generation Soap Bubbles by Blowing on Soap films / L. Salkin [et. al.] // Physical Review Letters, 2016. – Vol. 116, Iss. 7. – Article 077801. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
4. Камлюк, А.Н. Ствол пожарный ручной универсальный комбинированный с расходом до 5 л/с и возможностью формирования воздушно-механической пены / А.Н. Камлюк, А.А. Морозов, В.В. Пармон // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 1 (40). – С. 76–85. – EDN: ZEUEPZ.
5. Чан, Д.Х. Оценка диаметра пузырьков и скорости потока пенообразующей смеси для их образования на сетке пеногенерирующих устройств / Д.Х. Чан [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 84–94. DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. – EDN: QAENWG.
6. 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.
7. Качанов, И.В. Установки автоматического пожаротушения с предварительной аэрацией огнетушащей рабочей среды / И.В. Качанов, И.В. Карпенчук, С.Ю. Павлюков. – Минск: БНТУ, 2018. – 149 с.

**Влияние размеров ячейки сетки и расстояния от нее до сопла
пеногенерирующего устройства на дисперсность пены**
**Influence of the dimensions of the grid cell and the distance from it to the nozzle
of the foam-generating device on the foam dispersion**

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

Лихоманов Алексей Олегович

кандидат технических наук

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

PhD in Technical Sciences

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

Титовец Артем Федорович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
техносферной безопасности, курсант

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

Email: artemlucky619@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9952-6525

Artem F. Titovets

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Technosphere Safety Faculty,
cadet

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

Email: artemlucky619@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9952-6525

Полочанин Никита Сергеевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет
предупреждения и ликвидации
чрезвычайных ситуаций, курсант

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

Email: nik.polochanin@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6066-4683

Nikita S. Polochanin

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Faculty
of Emergency Prevention and Elimination,
cadet

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

Email: nik.polochanin@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6066-4683

Грачулин Александр Владимирович

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

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

Email: Grachulin_a@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3832-8258

Aleksandr V. Grachulin

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 Safety Systems,
Senior Lecturer

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

Email: Grachulin_a@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3832-8258

INFLUENCE OF THE DIMENSIONS OF THE GRID CELL AND THE DISTANCE FROM IT TO THE NOZZLE OF THE FOAM-GENERATING DEVICE ON THE FOAM DISPERSION

Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Titovets A.F., Polochanin N.S., Grachulin A.V.

Purpose. To experimentally evaluate the influence of the size of the grid cell and the distance from the nozzle to it on the dispersion of the resulting air-mechanical foam. Based on the obtained experimental data, check the adequacy of theoretical calculations of the diameter of the bubble formed on the flooded and non-flooded holes.

Methods. In the course of the work the main theoretical and empirical research methods were used. To determine the diameter of foam bubbles the multifunctional graphic editor GIMP was used.

Findings. Empirical data on the diameter of foam bubbles were obtained for the following ranges of variable parameters: grid cell size from 0.5×0.5 to 3.2×3.2 mm; foaming solution jet velocity at the nozzle outlet from 7 to 17 m/s and the distance from the nozzle outlet to the grid from 50 to 400 mm. It was established that at a distance of 200 mm from the nozzle outlet to the grid the average diameter of the foam bubbles was closest to the theoretically calculated values (deviation no more than 26 %, average deviation 14 %).

Application field of research. Development of devices for generating air-mechanical foam on the grids.

Keywords: foam, bubble diameter, bubble blowing speed, dispersion.

(The date of submitting: October 5, 2022)

REFERENCES

1. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foams. Theory and practice of their obtaining and destruction]. Moscow: Khimiya, 1975. 263 p. (rus)
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compressed air foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 223 p. (rus)
3. Salkin L., Schmit A., Panizza P., Courbin L. Generating Soap Bubbles by Blowing on Soap Films. *Physical Review Letters*, 2016. Vol. 116, Iss. 7. Article 077801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.077801.
4. Kamlyuk A.N., Morozov A.A., Parmon V.V. Stvol pozharный ruchnoy universal'nyy kombinirovanny s raskhodom do 5 l/s i vozmozhnost'yu formirovaniya vozdušno-mekhanicheskoy peny [Universal firefighter manual fire barrel combined with a flow rate of up to 5 l/s and the possibility of forming an air-mechanical foam]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2019. No. 1 (40). Pp. 76–85. (rus). EDN: ZEUEPZ.
5. Tran D.H., Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V., Platonov A.S., Titovets A.F. Otsenka diametra puzyr'kov i skorosti potoka penoobrazuyushchey smesi dlya ikh obrazovaniya na setke penogeneriruyushchikh ustroystv [Evaluation of the bubbles diameter and the blowing speed of the air-mechanical foam forming bubbles on the screen of the foam generators]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 1. Pp. 84–94. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.84. EDN: QAEHWG.
6. Likhomanov A.O., Kamlyuk A.N. Dlina nachal'nogo uchastka osesimmetrichnoy turbulentnoy strui, obrazuyushchey v pennom rozetochnom orositele dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya [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.
7. Kachanov, I.V., Karpenchuk I.V., Pavlyukov S.Yu. *Ustanovki avtomaticheskogo pozharotusheniya s predvaritel'noy aeratsiey ognetushashchey rabochey sredy* [Automatic fire extinguishing installations with preliminary aeration of the fire extinguishing working environment]. Minsk: Belarusian National Technical University, 2018. 149 p. (rus)