

Увеличение устойчивости противопожарной пены путем восполнения жидкой фазы при орошении

© С.И. Осипенко, А.В. Кокшаров ✉

Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22)

АННОТАЦИЯ

Введение. Разрушение пенных пленок происходит, когда они достигают критической толщины при потере жидкой фазы в результате синерезиса и испарения, которые довольно сложно замедлить. Предложен способ повышения устойчивости противопожарной пены за счет восполнения жидкой фазы путем орошения.

Методы исследования. Устойчивость пены оценивалась по времени разрушения 25 % от первоначального объема пены. Концентрация пенообразователя в орошаемом растворе варьировалась от 0,5 до 6 %. В качестве стабилизирующей добавки использовали натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (Na КМЦ). Натурные исследования проводили посредством подачи пены и распыленного раствора от двух автоцистерн АЦ-3,2-40(43253)001-МС.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что на устойчивость пены оказывают влияние интенсивность орошения и концентрация пенообразователя. Орошение пены растворами с низкой концентрацией пенообразователя приводит к вымыванию ПАВ из пленок с потерей устойчивости пены. Уменьшение интенсивности орошения повышает устойчивость пены вследствие восполнения потери влаги при испарении. Наибольшая устойчивость пены наблюдалась при орошении 2%-ным раствором пенообразователя, интенсивность орошения влияния не оказывала. Увеличение концентрации пенообразователя в орошаемом растворе привело к снижению устойчивости пены. Определено, что на поддержание объема пены путем орошения расходуется меньше пенообразователя, чем на восполнение разрушенного количества за счет дополнительной генерации пены. Показано, что с помощью орошения можно вводить в пену различные стабилизирующие добавки. Добавление Na КМЦ в орошаемый раствор привело к увеличению времени разрушения пены в 3–5 раз даже при однократном опрыскивании. Натурные испытания подтвердили целесообразность введения стабилизирующих добавок в пену посредством орошения.

Выводы. Результаты исследований показали, что существует возможность комбинированной подачи пены и растворов ПАВ, содержащих различные стабилизирующие добавки для тушения пожаров и получения стабильных пен.

Ключевые слова: концентрация пенообразователя; синерезис; разрушение пены; кратность пены; орошаемый раствор; стабильность пены; стабилизирующая добавка, тушение пеной

Для цитирования: Осипенко С.И., Кокшаров А.В. Увеличение устойчивости противопожарной пены путем восполнения жидкой фазы при орошении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 4. С. 65–73. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.65-73

✉ Кокшаров Александр Викторович, e-mail: koksharovab@e1.ru

Increasing the stability of the fire extinguishing foam by replenishing the liquid phase during sprinkling

© Sergey I. Osipenko, Aleksandr V. Koksharov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The destruction of foam films occurs when they reach critical thickness and lose the liquid phase as a result of syneresis and evaporation, which are rather difficult to slow down. We have proposed a method for increasing the stability of the fire extinguishing foam by means of replenishing the liquid phase through sprinkling.

Methods. Foam stability was measured by the time of destruction of 25 % of the initial foam volume. The concentration of the foaming agent in the sprinkled solution varied from 0.5 to 6 %. Carboxymethylcellulose sodium salt (Na CMC) was used as a stabilizing additive. Field studies were carried out by feeding foam and solution from two AT-3,2-40 (43253)001-MS tank cars.

Results and discussion. It has been established that the foam stability is influenced by the sprinkling intensity and the foaming agent concentration. Foam sprinkling with the solutions having low concentration of the

foaming agent leads to the washout of surfactants from the films that reduces the foam stability. The sprinkling intensity reduction boosts the foam stability due to the replenishment of the moisture lost through evaporation. The foam stability was maximal in case of sprinkling with a 2 % solution of the foaming agent, while the sprinkling intensity had no influence. An increase in the concentration of the foaming agent in the sprinkled solution led to a decrease in the foam stability. It is found that a smaller amount of the foaming agent is consumed to maintain the amount of foam through sprinkling than to replenish the destroyed amount through additional foam generation. It is shown that various stabilizing additives can be added to the foam in the process of sprinkling. If Na CMC is added to the solution exposed to sprinkling, the time of foam destruction goes up 3–5 times even in case of a non-recurrent sprinkling session. Field tests have confirmed the feasibility of adding stabilizing additives to the foam by means of sprinkling.

Conclusions. The results of the research have shown the feasibility of co-feeding the foam and surfactant solutions, containing various stabilizing additives, in order to extinguish fires and generate stable foams.

Keywords: foaming agent concentration; syneresis; foam destruction; foam expansion; sprinkled solution; foam stability; stabilizing additive; foaming

For citation: Osipenko S.I., Koksharov A.V. Increasing the stability of the fire extinguishing foam by replenishing the liquid phase during sprinkling. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(4):65-73. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.04.65-73 (rus).

✉ Aleksandr Viktorovich Koksharov, e-mail: koksharovab@e1.ru

Введение

Высокая устойчивость объема пены необходима не только при тушении пожаров, но и в следующих случаях: покрытие взлетно-посадочной полосы пеной при аварийной посадке самолета без шасси, предотвращение испарения легковоспламеняющихся жидкостей и химически опасных веществ при их разливе, покрытие пеной площадки при подготовке пенной атаки при тушении резервуаров и изоляции жидкости после ее тушения^{1, 2, 3}, [1, 2]. В зависимости от сложившейся обстановки, пенное покрытие должно сохраняться в течение нескольких часов. По мере его разрушения приходится подавать новое количество пены. Проблема низкой устойчивости пены требует проведения соответствующих исследований.

Пузырьки пены разрушаются при воздействии на них вибраций, пыли и потоков воздуха, в том числе нагретых при пожаре. Наиболее чувствительны к этому пузырьки с очень тонкими пленками, к утончению которых приводит обеднение жидкостью в результате синерезиса и при испарении влаги с поверхности [3, 4].

Ранее нами было показано, что при температурном воздействии разрушение пены лимитируется скоростью обеднения верхних слоев жидкостью и, чтобы повысить ее устойчивость, необходимо

удерживать или восполнять влагу в верхнем слое пены [5, 6]. Следовательно, повысить устойчивость пены можно, если контролировать потерю влаги из пузырьков.

Существует несколько способов замедления синерезиса. Одним из них является повышение вязкости жидкой фазы при введении различных загущающих веществ [7–9]. Введение твердых частиц приводит к закупорке пенных каналов [10–12], также частицы способны сорбироваться на пенных пленках, что значительно повышает гидравлические сопротивления вплоть до полного прекращения истечения жидкости. Введение твердых частиц коллоидного размера повышает вязкость самой пленки [10, 13, 14].

Испарение влаги довольно сложно замедлить. Однако в некоторых работах показано, что во вспененном слое испарение влаги происходит быстрее [15], причем процесс ускоряется при инфракрасном энергоподводе [16, 17].

Поскольку потерю жидкой фазы в пене остановить не просто, интересным представляется изучение возможности ее восполнения путем орошения пены и, следовательно, повышения ее устойчивости, что является целью настоящей исследовательской работы.

Методы исследования

Использовали синтетический углеводородный пенообразователь (ПО) общего назначения ПО-6РЗ и натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (Na КМЦ 75/400 ТУ 2231-001-68373646-2010). Устойчивость пены измеряли в баке размером 50 × 32 × 32 см.

Исследование устойчивости пены при орошении водными растворами ПАВ

Пену получали с помощью установки для определения ее кратности и устойчивости. Пена,

¹ Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках : утв. ГУГПС МВД России (М-во внутр. дел Рос. Федерации. Гл. упр. Гос. противопожар. службы). 1999 г. М. : ГУГПС МВД России, 2000. 78 с.

² Рекомендации по тушению пожаров на воздушных судах на аэродромах гражданской авиации : договор от 11 декабря 1990 г. № 80.123-1540.

³ Рекомендации по организации и ведению боевых действий подразделениями пожарной охраны при тушении пожаров на объектах с наличием аварийно химически опасных веществ. М. : ВНИИПО. 2003.

полученная посредством лабораторного пеногенератора и ствола Пурга-5 при одинаковых давлениях раствора перед распылителем и концентрации ПО в растворе, является аналогичной по своей структуре и кратности. Пенной наполняли бак, после чего с одинаковыми интервалами проводили ее опрыскивание из распылителя раствором ПО с заданной концентрацией и измеряли время разрушения 25 % пены от ее первоначального объема. Интенсивность орошения регулировали путем увеличения или уменьшения частоты опрыскивания, которая варьировалась от 1 до 0,05 с⁻¹.

Интенсивность орошения рассчитывали по формуле (1):

$$I = \frac{m}{\tau S} 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{мин}}, \quad (1)$$

где m — масса затраченного на орошение раствора, г;
 τ — время орошения, мин;
 S — площадь поверхности пены, 0,10 м².

Исследование устойчивости пены при орошении водными растворами, содержащими Na КМЦ

Пенной наполняли бак, после чего один раз орошали ее 100 мл раствора, содержащего 2 % ПО и заданного количества Na КМЦ. Замеряли время разрушения 25 % пены от ее первоначального объема.

Совместная подача пены и растворов ПАВ с Na КМЦ

В испытаниях использовались две автоцистерны АЦ-3,2-40(43253)001-МС. От одной автоцистерны подавалась пена с помощью пеногенератора Пурга-5, одновременно от другой автоцистерны через ствол РСКУ-50А распыленной струей на пену подавался раствор ПО с концентрацией 2 % и Na КМЦ 0,02 кг/л. Данный раствор был приготовлен в сторонней емкости и забирался в пожарный насос с помощью напорно-всасывающего рукава. Кратность пены определяли путем взвешивания пробы пены объемом 5 л.

Результаты и их обсуждение

Очевидно, что орошение пены водой повлечет за собой вымывание ПАВ из пенных пленок, что приведет к потере их прочности и последующему разрушению, поэтому необходимо, чтобы раствор содержал такое количество ПАВ, которое не вызовет обеднение адсорбированных слоев.

Для генерации пены в пожаротушении используют пеногенераторы эжекторного типа, в которых ее образование происходит в высокоскоростном режиме, при котором требуется высокая скорость заполнения поверхностных слоев пленки молекулами ПАВ. Поэтому для устойчивого пено-

образования необходима достаточно высокая концентрация ПАВ [18, 19]. Однако при отсутствии внешних воздействий пена будет устойчива при значительно меньших концентрациях ПАВ, следовательно, минимальная концентрация орошаемого раствора может достигать предела пенообразующей способности данного ПО.

При проведении исследований нами изучалось влияние интенсивности орошения и концентрации ПО в орошаемом растворе на устойчивость пены (табл. 1). Время разрушения 25 % объема пены без орошения составляло 25 ± 3 мин.

Результаты показали, что интенсивность орошения и концентрация ПО оказывают влияние на устойчивость пены.

Высокая интенсивность орошения (0,083–0,43 кг/м²·с) низкоконтрированными растворами (0,5–1,0 %) негативно влияет на устойчивость пены. Происходит вымывание ПАВ и снижение прочности пленок. Снижение интенсивности орошения (0,021–0,041 кг/м²·с), напротив, увеличивает время устойчивости объема пены. Вероятно, происходит восполнение той влаги, которую теряет пена в результате испарения, и ПАВ не вымываются.

Наибольшая устойчивость пены наблюдалась при орошении 2%-ным раствором ПО и составляла около 150 мин. При этом интенсивность орошения не оказывала влияния на время разрушения пены.

Увеличение концентрации ПО до 4 и 6 % в орошаемом растворе, наоборот, привело к снижению устойчивости пены. Высокая концентрация ПО необходима для устойчивой пеногенерации [18, 19], но она не повышает устойчивость объема пены и стойкость к температурному воздействию. Это было показано в более ранних наших исследованиях [20].

Интересно оценить расход ПО на поддержание объема пены путем орошения с учетом ПО, необходимого для получения исходного объема пены. Данный показатель был рассчитан по формуле (2):

$$q_{\text{ПО}} = \frac{m_{\text{ПО}} + mC0,01}{\tau} \frac{\text{г}}{\text{мин}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{ПО}}$ — масса ПО, необходимого для получения пены, 7,5 г;

m — масса раствора, затраченного на орошение, г;

C — концентрация орошающего раствора, %;

τ — время орошения, мин.

В результате установлено (табл. 1), что при орошении низкоконтрированными растворами расходуется гораздо меньше ПО, чем для поддержания требуемого объема пены за счет генерации ее нового объема (0,3 г/мин). Наилучший результат

Таблица 1. Результаты исследования устойчивости пены в зависимости от интенсивности орошения и концентрации ПО
Table 1. Results of the study on foam stability depending on the sprinkling intensity and the foaming agent concentration

Измеряемый параметр Measured parameter	Интенсивность орошения, кг/м ² ·мин Sprinkling intensity, kg/m ² ·min				
	0,42–0,45	0,16–0,18	0,070–0,085	0,037–0,042	0,020–0,021
C_{op} / C_{ss}	0,25				
m	511	284	147	166	105
I	0,43	0,16	0,070	0,037	0,021
τ	12	17	21	45	50
$q_{ПО} / q_{f.a}$	0,73	0,47	0,37	0,18	0,16
C_{op} / C_{ss}	0,5				
m	624	300	209	212	127
I	0,45	0,17	0,080	0,041	0,021
τ	14	18	26	52	60
$q_{ПО} / q_{f.a}$	0,76	0,50	0,33	0,16	0,14
C_{op} / C_{ss}	0,75				
m	729	400	238	228	147
I	0,42	0,17	0,082	0,041	0,021
τ	18	24	29	55	70
$q_{ПО} / q_{f.a}$	0,85	0,48	0,34	0,18	0,13
C_{op} / C_{ss}	1,0				
m	907	440	287	291	253
I	0,42	0,17	0,084	0,042	0,021
τ	22	27	34	70	120
$q_{ПО} / q_{f.a}$	0,77	0,45	0,30	0,15	0,084
C_{op} / C_{ss}	2,0				
m	6420	1805	1268	725	328
I	0,43	0,18	0,085	0,041	0,022
τ	150	100	150	175	150
$q_{ПО} / q_{f.a}$	0,91	0,44	0,22	0,13	0,09
C_{op} / C_{ss}	4,0				
m	1403	825	323	120	57,8
I	0,43	0,17	0,083	0,040	0,020
τ	33	50	39	30	29
$q_{ПО} / q_{f.a}$	1,93	0,81	0,52	0,41	0,34
C_{op} / C_{ss}	6,0				
m	1680	302	164	88,8	84,0
I	0,42	0,17	0,082	0,042	0,021
τ	40	18	20	21	40
$q_{ПО} / q_{f.a}$	2,7	1,4	0,87	0,61	0,31

Примечание: C_{op} — концентрация орошаемого раствора, %; m — масса раствора ПО, затраченного на орошение пены, г; I — интенсивность орошения, кг/м²·мин; τ — время разрушения 25 % объема пены, мин; $q_{ПО}$ — расход ПО, г, на поддержание объема пены с учетом ПО, необходимого для получения исходного объема пены в минуту.

Note: C_{ss} is the concentration of the sprinkled solution, %; m is the mass of the foaming agent solution spent to sprinkle the foam, g; I is the sprinkling intensity, kg/m²·min; τ is the time of destruction of 25 % of the foam, min; $q_{f.a}$ is the consumption of the foaming agent, g, needed to maintain the foam amount, taking into account the amount of the foaming agent needed to obtain the initial foam amount during one minute.

был получен при орошении 2%-ным раствором ПО с наименьшей интенсивностью.

Таким образом, гораздо эффективнее поддерживать (сохранять) объем полученной пены, чем восполнять его за счет дополнительной подачи.

Поскольку орошение пены растворами ПАВ не приводит к их разрушению, то данный способ открывает возможность введения в пену добавок, которые невозможно ввести в исходный раствор для получения пены из-за повышения вязкости или

наличия твердых частиц, которые забивают сетку пеногенератора.

Нами уже было показано, что введение Na КМЦ позволяет значительно замедлить истечение жидкости, но вводить данную добавку в рабочий раствор для получения пены нельзя по ранее приведенным причинам [21]. Поэтому было интересно исследовать стабилизацию пены путем орошения растворами, содержащими Na КМЦ.

Таблица 2. Изменение высоты слоя пены и кратности с течением времени

Table 2. A change in the foam layer height and expansion ratio over time

Содержание Na КМЦ, г/л Na CMC content, g/l	0	5	10	15	20
Время разрушения 25 % объема, мин Time of destruction of 25 % of the amount, min	30	110	127	135	144



Пена после генерации (слева); пена спустя 30 мин после генерации (справа)

The foam immediately after its generation (left); the foam 30 minutes after its generation (right)

Таблица 3. Результаты испытаний с использованием пожарной техники
Table 3. The results of testing performed using fire-fighting machinery

Время, мин Time, min	Кратность Expansion ratio	Высота слоя, см Layer height, cm	Время, мин Time, min	Кратность Time, min	Высота слоя, см Layer height, cm
Контроль (без орошения) Control (no sprinkling)			Орошение раствором Sprinkling by the solution		
0	65	35	0	50	30
10	789	33	12	316	30
20	1200	28	22	286	30
32	1000	24	34	286	30
40	1200	21	42	261	29
50	1200	18	53	353	29
61	1364	15	63	240	28

Результаты показали существенное увеличение времени разрушения пены даже при однократном опрыскивании и незначительном введении в нее добавки (табл. 2).

Использование прозрачной стеклянной емкости позволило наблюдать за процессом (см. рисунок). Добавка помогает связать влагу в верхнем слое пены, в результате ее разрушение происходит медленнее. Благодаря этому предохраняются нижние слои пены от высыхания. Таким образом, верхний слой защищает пену от высыхания и значительно продлевает время ее существования.

Следующим этапом исследований стало проведение натуральных испытаний с использованием пожарной техники. Пена подавалась на две площадки: одна выступала в качестве контрольной, на другую одновременно с подачей пены подавался распыленный раствор, содержащий 2 % ПО и Na КМЦ 0,02 кг/л. В ходе эксперимента следили за изменением кратности и высоты слоя пены (табл. 3).

Начальная кратность пены после орошения была ниже вследствие поступления в нее дополнительной влаги. Однако в результате синергизма у пены, не обработанной раствором, наблюдается стремительное увеличение кратности по сравнению с другой. Также испытания подтвердили, что удержание влаги в верхнем слое делает его более устойчивым к внешним воздействиям. Так, верхний слой выступает в роли защитного барьера

нижних слоев пены, что в целом увеличивает время жизни пенного покрытия.

Выводы

Исследована возможность увеличения устойчивости пены за счет восполнения жидкой фазы путем орошения верхних слоев. Установлены закономерности влияния интенсивности орошения и концентрации орошаемого раствора. Показана экономическая целесообразность, заключающаяся в том, что на поддержание (сохранение) объема полученной пены затрачивается меньше ПО, чем на ее восполнение за счет дополнительной генерации пены.

Предложен новый способ введения стабилизирующих добавок в пену и показана его целесообразность при проведении натуральных испытаний с использованием пожарной техники.

Результаты данных исследований имеют практическую значимость, поскольку могут быть использованы для увеличения времени существования пены при проведении аварийно-спасательных работ, например, при разливе нефтепродукта, который должен быть покрыт пеной для предотвращения его воспламенения, или при проведении специальной обработки, где важным является сохранение объема пены.

Результаты работы открывают перспективы дальнейших исследований для изучения комбинированной подачи пены и водных растворов ПАВ с различными добавками для тушения пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ramsden N.* Storage tank firefighting // *Loss Prevention Bulletin*. 2011. No. 222.
2. *Ratzer A.F.* History and development of foam as a fire extinguishing medium // *Industrial & Engineering Chemistry*. 1956. Vol. 48. Issue 11. Pp. 2013–2016. DOI: 10.1021/ie50563a030
3. *Gochev G., Platikanov D., Miller R.* Chronicles of foam films // *Advances in colloid and interface science*. 2016. Vol. 233. Pp. 115–125. DOI: 10.1016/j.cis.2015.08.009
4. *Walstra P.* Principles of foam formation and stability // *Foams: Physics, chemistry and structure*. London : Springer, 1989. Pp. 1–15. DOI: 10.1007/978-1-4471-3807-5_1
5. *Yu X. et al.* Comparative studies on foam stability, oil-film interaction and fire extinguishing performance for fluorine-free and fluorinated foams // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 133. Pp. 201–215. DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.016
6. *Кокишаров А.В., Осипенко С.И., Гайнуллина Е.В.* Исследование термической устойчивости пены различной кратности // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 3. С. 103–110. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.103-110
7. *Любимов В.Н., Скушеникова А.И., Ермакова Т.Г., Волкова Л.И.* Повышение устойчивости противопожарных пен при помощи полимерных добавок различной природы // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Vol. 23. № 4. С. 77–80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21519973>
8. *Platikanov D., Exerowa D.* Thin liquid films // *Fundamentals of Interface and Colloid Science*. 2005. Vol. 5. Pp. 6.1–6.91. DOI: 10.1016/s1874-5679(05)80010-8
9. *Nguyen A.V.* Liquid drainage in single Plateau borders of foam // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002. Vol. 249. Issue 1. Pp. 194–199. DOI: 10.1006/jcis.2001.8176
10. *Horozov T.* Foams and foam films stabilised by solid particles // *Current Opinion Colloid Interface Science*. 2008. Vol. 13. Issue 3. Pp. 134–137. DOI: 10.1016/j.cocis.2007.11.009
11. *Вилкова Н.Г., Еланева С.И., Волкова Н.В., Бровкина Е.Н.* Пены, стабилизированные твердыми частицами: вопросы устойчивости // *Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского*. 2011. № 25. С. 684–689. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17391696>
12. *Кокишаров А.В., Гайнуллина Е.В., Кондратьева М.А.* Изучение влияния размера и концентрации частиц твердой фазы на устойчивость пенопорошковых огнетушащих составов // *Техносферная безопасность*. 2021. № 1 (30). С. 60–68. URL: <https://uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%2030/6.pdf>
13. *Binks B.B., Horozov T.S.* Aqueous foams stabilized solely by silica nanoparticles // *Angewandte Chemie International Edition*. 2005. Vol. 44. Issue 24. Pp. 3722–3725. DOI: 10.1002/anie.200462470
14. *Gonzenbach U.T., Studart A.R., Tervoort E., Gauckler L.J.* Stabilization of foams with inorganic colloidal particles // *Langmuir*. 2006. Vol. 22. Issue 26. Pp. 10983–10988. DOI: 10.1021/la061825a
15. *Алексян И.Ю., Буйнов А.А.* Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование : монография. Астрахань : Изд-во АГТУ, 2004. 380 с.
16. *Алексян И.Ю., Давидюк В.В., Саитова Л.Х.-А.* Оптимизация режимов вакуумной пеносушки сухих моющих средств на основе белковых гидролизатов // *Вестник астраханского государственного технического университета*. 2005. № 2 (25). С. 292–296. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11160216>
17. *Boyd C.F., Di Marzo M.* The behavior of a fire-protection foam exposed to radiant heating // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998. Vol. 41. Issue 12. Pp. 1719–1728. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00280-9
18. *Кокишаров А.В., Осипенко С.И.* Определение критических параметров образования пены на сетках пеногенератора средней кратности // *Техносферная безопасность*. 2017. № 1 (14). С. 35–38.
19. *Kovalyshyn V., Kyryliv Y., Grushovinchuk O.* Експериментальні дослідження процесу взаємодії струменів повітряно-механічної піни різної кратності під час їх польоту // *Пожежна безпека*. 2018. № 32. С. 32–38. DOI: 10.32447/20786662.32.2018.05
20. *Кокишаров А.В., Осипенко С.И., Гайнуллина Е.В., Кретунов А.А.* Исследование зависимости термической устойчивости пены от концентрации пенообразователя // *Техносферная безопасность*. 2020. № 2 (27). С. 11–15. URL: <https://www.uigps.ru/userfls/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%2027/2.pdf>
21. *Кокишаров А.В., Марков В.Ф., Бучельников Д.Ю., Терентьев В.В.* Стабилизация пены низкой кратности натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2014. Т. 23. № 10. С. 79–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23136740>

REFERENCES

1. Ramsden N. Storage tank firefighting. *Loss Prevention Bulletin*. 2011; 222.
2. Ratzler A.F. History and development of foam as a fire extinguishing medium. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1956; 48(11):2013-2016. DOI: 10.1021/ie50563a030
3. Gochev G., Platikanov D., Miller R. Chronicles of foam films. *Advances in colloid and interface science*. 2016; 233:115-125. DOI: 10.1016/j.cis.2015.08.009
4. Walstra P. Principles of foam formation and stability. *Foams: Physics, chemistry and structure*. London, Springer, 1989; 1-15. DOI: 10.1007/978-1-4471-3807-5_1
5. Yu X. et al. Comparative studies on foam stability, oil-film interaction and fire extinguishing performance for fluorine-free and fluorinated foams. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 133:201-215. DOI: 10.1016/j.psep.2019.11.016
6. Koksharov A.V., Osipenko S.I., Gainullina E.V. Study of the thermal stability of foam of different expansion ratio. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):103-110. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.103-110 (rus).
7. Lyubimov V.N., Skushnikova A.I., Ermakova T.G., Volkova L.I. Improving the sustainability of fire foams using polymeric additives of different nature. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(4):77-80. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21519973> (rus).
8. Platikanov D., Exerowa D. Thin liquid films. *Fundamentals of Interface and Colloid Science*. 2005; 5:6.1-6.91. DOI: 10.1016/s1874-5679(05)80010-8
9. Nguyen A.V. Liquid drainage in single Plateau borders of foam. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002; 249(1):194-199. DOI: 10.1006/jcis.2001.8176
10. Horozov T. Foams and foam films stabilised by solid particles. *Current Opinion Colloid Interface Science*. 2008; 13(3):134-137. DOI: 10.1016/j.cocis.2007.11.009
11. Vilkovala N.G., Eleneva S.I., Volkova N.V., Brovkinina E.N. Foams stabilized by solid particles: the problem of stability. *Izvestiya PSPU im. V.G. Belinsky*. 2011; 25:684-689. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17391696> (rus).
12. Koksharov A.V., Gainullina E.V., Kondratieva M.A. Investigation of the effect of solid phase particles size and concentration on the stability of foam-powder fire extinguishing compositions. *Technosphere safety*. 2021; 1(30):60-68. URL: <https://uigps.ru/userfiles/ufiles/nauka/journals/ttb/TB%2030/6.pdf> (rus).
13. Binks B.B., Horozov T.S. Aqueous foams stabilized solely by silica nanoparticles. *Angew. Chemistry*. 2005; 44(24):3722-3725. DOI: 10.1002/anie.200462470
14. Gonzenbach U.T., Studart A.R., Tervoort E., Gauckler L.J. Stabilization of foams with inorganic colloidal particles. *Langmuir*. 2006; 22(26):10983-10988. DOI: 10.1021/la061825a
15. Aleksanyan I.Yu., Buinov A.A. *High-intensity drying of food products. Foam gun. Theory. Practice. Modeling : monograph*. Astrakhan, AGTU Publishing House, 2004; 380. (rus).
16. Aleksanyan I.Yu., Davidiyuk V.V., Saipova L.Kh. A. Optimization of operating conditions of vacuum foam dryer for dry detergents on the basis of protein hydrolysates. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2005; 2(25):292-296. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11160216> (rus).
17. Boyd C.F., Di Marzo M. The behavior of a fire-protection foam exposed to radiant heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1998; 41(12):1719-1728. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00280-9
18. Koksharov A.V., Osipenko S. I. The determination of the critical parameters of the foam generation on the grid foam generator average multiplicity. *Technosphere safety*. 2017; 1(14):35-38. (rus).
19. Kovalyshyn V.V., Kyryliv Y.B., Grushovinchuk O.V. Interaction between air-filled foam jets of different expansion ratios: experimental study. *Fire Safety*. 2018; 32:32-38. DOI: 10.32447/20786662.32.2018.05 (ukr).
20. Koksharov A.V., Osipenko S.I., Gainullina E.V., Krikunov A.A. Investigation of the dependence of the thermal stability of foam on the concentration of the foaming agent. *Technosphere safety*. 2020; 2(27):11-15. (rus).
21. Koksharov A.V., Markov V.F., Buchelnikov D.Yu., Terentyev V.V. Stabilization of high density foams sodium salt of carboxymethylcellulose. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(10):79-83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23136740> (rus).

Поступила 04.05.2021, после доработки 14.06.2021;
принята к публикации 05.07.2021

Received May 4, 2021; Received in revised form June 14, 2021;
Accepted July 5, 2021

Информация об авторах

ОСИПЕНКО Сергей Игоревич, старший преподаватель кафедры пожаротушения и аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 1011020; e-mail: angero07@rambler.ru

КОКШАРОВ Александр Викторович, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры пожаротушения и аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Российская Федерация; РИНЦ ID: 182341; e-mail: koksharovab@e1.ru

Information about the authors

Sergey I. OSIPENKO, Senior Lecturer of the Department of Fire Fighting and Rescue Operations, the State Fire Academy of the of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation; ID RISC: 1011020; e-mail: angero07@rambler.ru

Aleksandr V. KOKSHAROV, Cand. Sci. (Chem.), Docent, Associate Professor of the Department of Fire Fighting and Rescue Operations, the State Fire Academy of the of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation; ID RISC: 182341; e-mail: koksharovab@e1.ru