

Исследование термической устойчивости пены различной кратности

© А.В. Кокшаров✉, С.И. Осипенко, Е.В. Гайнулина

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22)

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время промышленность выпускает широкий спектр пеногенераторов для получения огнетушащих пен, а производимые ими пены существенно различаются кратностью и, соответственно, устойчивостью в условиях пожара. Поскольку основное разрушающее действие на пену оказывают тепловые потоки, то целью данной работы является установление закономерностей разрушения пены различной кратности при термическом воздействии.

Методы исследования. В испытаниях использовали пену кратностью от 7,5 до 80, полученную механическим взбиванием 6%-го раствора пенообразователя ПО-6РЗ. Термическая устойчивость пены изучалась при воздействии теплового потока от пламени газовой горелки на слой пены. При проведении эксперимента фиксировали изменение высоты столба пены во времени.

Результаты и обсуждение. Результаты измерений, представленные в виде зависимости скорости разрушения слоя пены от времени, количества высвобожденной жидкой фазы на 1 м²с, зависимости скорости разрушения слоя пены от ее плотности, позволили выявить ряд закономерностей. Скорость разрушения пены кратностью до 30 на протяжении всего времени термического воздействия остается постоянной. С повышением кратности пены наблюдается возрастание скорости разрушения на начальном этапе воздействия теплового потока. При кратности пены более 50 на начальном этапе происходит резкое увеличение скорости разрушения, которая в дальнейшем снижается по мере уменьшения столба пены. В условиях эксперимента лучшие характеристики показала пена кратностью 50, поскольку у пены с меньшей кратностью существенный вклад в ее разрушение вносит синерезис, а пены с большей кратностью разрушаются при механическом воздействии конвективных потоков пламени.

Заключение. Исследование закономерностей разрушения пены при термическом воздействии позволило установить, что ее разрушение лимитируется скоростью обеднения верхних слоев жидкостью.

Ключевые слова: пенообразователь; термическое воздействие; синерезис; разрушение пены; конвективный поток пламени

Для цитирования: Кокшаров А.В., Осипенко С.И., Гайнулина 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

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

Study of the thermal stability of foam of different expansion ratio

© Aleksandr V. Koksharov✉, Sergey I. Osipenko, Elena V. Gaynullina

Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia (Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Currently, the industry produces a wide range of foam generators to produce fire-extinguishing foams, and the foams they produce differ significantly in their expansion ratio and, consequently, fire resistance. Since heat fluxes have the main destructive effect on the foam, the purpose of this paper is to establish the patterns of destruction of foam of different expansion ratio when heated.

Methods of Research. The foam with expansion ratio from 7.5 to 80 was used for the tests. It was obtained by mechanical beating of 6 % solution of foaming agent PO-6RZ. The thermal stability of the foam was studied when the heat flow from the gas burner flame affects the foam layer. During the experiment, the change in the height of the foam column in time was recorded.

Results and Discussion. The results of measurements, presented in the form of dependence of foam layer destruction rate on time, quantity of released liquid phase on 1 m²s, dependence of foam layer destruction rate on its density allowed revealing a number of patterns. The destruction rate of foam with an expansion ratio of up to 30 remains constant throughout the entire duration of thermal exposure. As the foam expansion ratio increases, the rate of destruction at the initial stage of heat flux exposure increases. With a foam expansion ratio of more than 50, there is initially a sharp increase in the rate of destruction, which subsequently decreases as the foam column decreases. In the conditions of the experiment, the best characteristics were shown by the foam with an expansion ratio of 50, because in the foam with a smaller expansion ratio

the syneresis makes a significant contribution to its destruction, and the foams with a larger expansion ratio are destroyed by the mechanical effect of convective flame flows.

Conclusion. The study of the foam destruction patterns under thermal impact allowed establishing the fact that its destruction is limited by the rate of impoverishment of the upper layers with liquid.

Keywords: foaming agent; thermal effect; syneresis; foam destruction; convective flame flow

For citation: Koksharov A.V., Osipenko S.I., Gaynullina E.V. Study of the thermal stability of foam of different expansion ratio. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):103-110. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.103-110

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

Введение

В настоящее время промышленность выпускает широкий спектр пеногенераторов: ГПС, «Пурга», стволы СВП и ОРТ с различными насадками. Также в пожарно-спасательные подразделения поступает пожарная техника, позволяющая получать компрессионную пену [1, 2]. Несмотря на заявления производителей об эффективности данной пены, отсутствуют количественные данные об ее огнетушащей способности, что вызывает затруднения при планировании пожаротушения и сравнительной оценке эффективности компрессионной пены и пены, полученной с помощью других доступных пеногенераторов [3, 4].

Пена, производимая различными устройствами, различается кратностью, в связи с чем следует ожидать разную огнетушащую способность. Причиной может быть разная скорость нагрева пенных пленок. Поверхностная активность молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ) зависит от температуры раствора, с ее повышением происходит миграция молекул ПАВ с адсорбированных слоев в объем раствора, в результате чего снижается прочность пленки вплоть до ее разрушения [5–9].

В пенах высокой и средней кратности пузырьки имеют очень тонкую оболочку, поэтому при термическом воздействии происходит практически мгновенное нагревание и разрушение пенной пленки [10, 11]. В результате такого быстрого разрушения пена может даже не достичь поверхности горючего вещества [12, 13]. Для низкократных пен за счет высокого содержания жидкой фазы, напротив, требуется большее время на нагрев пены и, как следствие, наблюдается повышенная термическая устойчивость. Однако для получения низкократных пен требуется большое количество пенообразующего раствора [14].

Знание причин и закономерностей термического разрушения пены может оказаться полезным для решения проблемы устойчивости пены в условиях пожара и для разработки эффективных способов ее практического использования.

Поэтому целью работы стало проведение лабораторных исследований и установление закономерностей разрушения пены различной кратности при термическом воздействии.

Методы исследования

В испытаниях использовалась пена кратностью от 7,5 до 80, полученная механическим взбиванием 6 %-го раствора пенообразователя ПО-6РЗ.

Для получения пены был выбран синтетический углеводородный пенообразователь общего назначения ПО-6РЗ, поскольку он получил наиболее широкое применение по сравнению с перфторированными пенообразователями [15, 16].

Термическая устойчивость пены изучалась на установке (рис. 1) под действием теплового потока от пламени газовой горелки на слой пены. Воздействие проводилось при высокой температуре, чтобы снизить влияние на процесс разрушения пены других параллельных процессов (синерезис, коалесценция, испарение жидкости с поверхностных слоев и т.п.) [17].

Пеной наполнялся цилиндр, изготовленный из металлической сетки. Сетка не препятствовала движению продуктов горения от газовой горелки, поэтому поверхность пены довольно равномерно подвергалась нагреванию. При проведении эксперимента фиксировалось изменение высоты столба пены от времени.

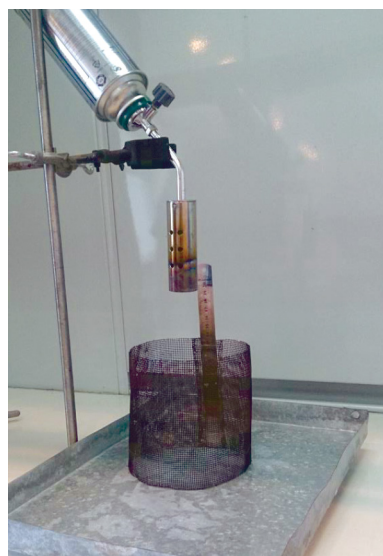


Рис. 1. Установка для определения термической устойчивости пены

Fig. 1. Foam thermal stability unit

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1. Как и следовало ожидать, с повышением кратности пены возрастает скорость ее разрушения при термическом воздействии.

Дифференциальная форма dh/dt позволяет установить, как изменялась скорость разрушения пены в процессе эксперимента (табл. 2).

Скорость разрушения пены кратностью до 30 на протяжении всего времени термического воздействия остается примерно постоянной. Затем, с повышением кратности пены наблюдается незначительное возрастание скорости разрушения на на-

чальном этапе воздействия по сравнению со скоростью в конце эксперимента. У пены кратностью более 50 наблюдается резкое увеличение скорости разрушения на начальном этапе, в дальнейшем скорость разрушения снижается по мере уменьшения столба пены. Данный факт можно объяснить механическим разрушающим воздействием пламени на тонкие пенные пленки [17, 18]. Впоследствии высвобожденная влага питает нижележащие слои, что приводит к утолщению пузырьков оболочек, которые становятся гораздо более устойчивыми к механическому воздействию, и дальнейшее разрушение пены при термическом воздействии происходит с меньшей скоростью.

Таблица 1. Изменение высоты столба пены h , см, при термическом воздействии пламени газовой горелки в течение времени t , с

Table 1. Change of the height of the foam column h , cm, under the thermal influence of the gas burner flame during the time t , s

Высота столба пены h , см Foam column height h , cm	Кратность пены K_n / Foam expansion ratio E_f														
	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	16	12	7	7	5	4	3	3	2	2	2	2	1	1	1
10	38	27	23	17	14	13	9	9	8	7	6	5	3	3	3
8	60	44	38	29	25	22	16	16	15	13	10	11	7	7	6
6	78	58	49	42	37	31	26	25	23	21	15	16	10	10	10
4	92	72	62	53	49	39	34	31	30	29	23	22	16	15	14
2	115	91	78	64	58	47	43	40	38	37	30	27	22	21	17

Таблица 2. Скорость разрушения столба пены dh/dt , см/с, под термическим воздействием пламени газовой горелки в зависимости от высоты столба пены h , см

Table 2. Destruction rate of foam column dh/dt , cm/s, under the thermal influence

Высота столба пены h , см Foam column height h , cm	Кратность пены K_n / Foam expansion ratio E_f														
	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0,06	0,08	0,14	0,14	0,19	0,24	0,32	0,40	0,42	0,50	0,50	0,67	1,1	1,1	1,1
10	0,09	0,14	0,13	0,19	0,23	0,24	0,32	0,30	0,36	0,38	0,50	0,57	1,1	1,1	1,1
8	0,09	0,11	0,14	0,17	0,18	0,21	0,30	0,30	0,28	0,33	0,45	0,33	0,51	0,51	0,51
6	0,11	0,15	0,17	0,16	0,17	0,22	0,21	0,23	0,26	0,28	0,42	0,42	0,51	0,50	0,67
4	0,14	0,14	0,16	0,18	0,17	0,24	0,24	0,30	0,29	0,24	0,26	0,34	0,36	0,40	0,56
2	0,09	0,11	0,13	0,18	0,22	0,26	0,22	0,24	0,26	0,24	0,29	0,38	0,34	0,33	0,57
Среднее Average	0,10	0,12	0,14	0,17	0,19	0,24	0,27	0,29	0,31	0,33	0,40	0,45	0,60	0,69	0,77

Таблица 3. Средняя скорость разрушения пены в зависимости от кратности**Table 3.** Average foam destruction rate depending on expansion ratio

Скорость разрушения пены, л/м ² ·с, 10 ⁻² Foam destruction rate, l/m ² ·s, 10 ⁻²	Кратность пены K_n / Foam expansion ratio E_f														
	7,5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
	13	12	9,5	8,5	7,8	7,9	7,7	7,3	6,9	6,6	7,3	7,5	10,1	9,9	9,6

Представление скорости разрушения пены в виде количества высвобожденной жидкой фазы с 1 м²·с имеет практическую значимость, поскольку показывает критическую интенсивность подачи рабочего раствора пенообразователя для получения пены, формирующей пенный слой на горючем веществе (табл. 3). Наименьшая скорость разрушения в условиях проведения эксперимента наблюдается для пены кратностью 50.

Пена низкой кратности разрушается медленнее прочих (см. табл. 3), но поскольку она содержит большое количество жидкой фазы, то для восполнения ее объема требуется израсходовать такое же количество раствора, что и содержалось в разрушившейся пене. Поэтому, чем ниже кратность пены, тем выше должна быть интенсивность подачи пенообразователя в растворе.

Пены высокой кратности разрушаются не только от тепла, но и от механического воздействия конвективных потоков. Наличие дополнительного разрушающего фактора приводит к увеличению скорости разрушения пены и, как следствие, к критической интенсивности подачи пены при тушении пожара (см. табл. 3).

Предположительно, механизм разрушения пены связан с достижением определенного критического значения температуры пенных пленок. Отсюда можно предположить, что скорость разрушения пены должна линейно зависеть от толщины пенной пленки, которая пропорциональна плотно-

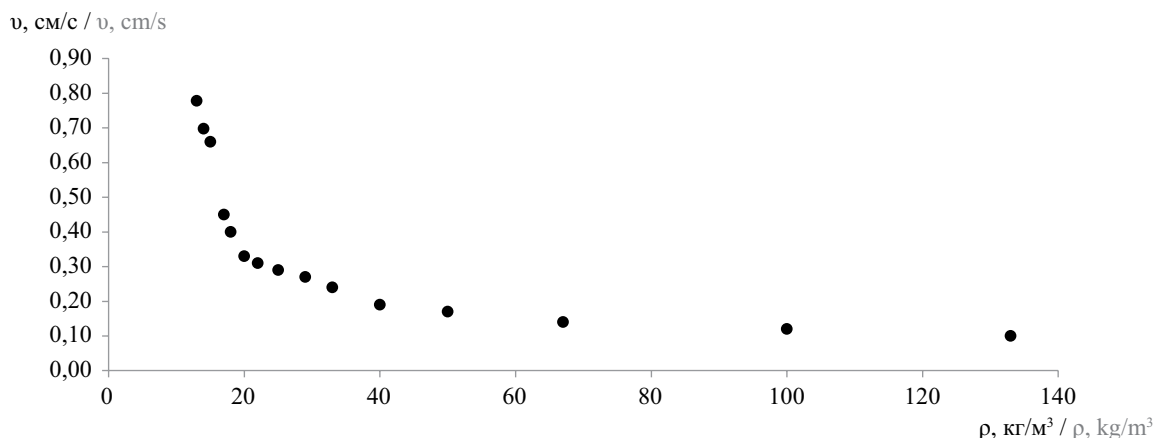
сти пены. Проследить характер зависимости можно, если построить график зависимости скорости разрушения столба пены (см/с) от плотности пены (кг/м³) (рис. 2).

На графике можно выделить три участка (см. рис. 2). Для пены плотностью от 12,5 кг/м³ ($K_n = 80$) до 20 кг/м³ ($K_n = 50$) наблюдается линейное снижение скорости разрушения. Сильное падение скорости разрушения пены связано с утолщением пузырьковой пленки и повышением ее способности сопротивляться разрыву при воздействии конвективных потоков, вызванных пламенем.

При плотности 20 кг/м³ ($K_n = 50$) на графике присутствует точка перегиба, появление которой связано с тем, что при утолщении пенные пленки становятся устойчивыми к механическому воздействию и разрушаются только под воздействием температуры [19].

При дальнейшем увеличении плотности пены с 20 до 40 кг/м³ ($K_n = 25$) скорость разрушения пены линейно снижается. При увеличении содержания влаги в пене в 2 раза, скорость разрушения снижается примерно в 1,7 раза. Увеличение количества жидкой фазы при постоянстве величины теплового потока приводит к увеличению времени достижения температуры, при которой происходит разрушение пены, следствием чего является снижение скорости разрушения.

При плотности пены более 40 кг/м³ ($K_n = 25$) скорость разрушения пены снижается незначитель-

**Рис. 2.** График зависимости скорости разрушения высоты столба пены (v) от плотности пены (ρ)**Fig. 2.** Dependency graph of the foam column height destruction rate (v) from the foam density (ρ)

но. Это связано с тем, что существенную роль начинает играть синерезис, который приводит к уменьшению плотности верхней части пены, поэтому термическому воздействию подвергается уже пена с меньшим содержанием жидкой фазы.

С другой стороны, пена представляет собой сложную динамическую систему, в которой происходит множество процессов. После образования пены начинается синерезис [6, 10, 20]. Истечение жидкости может быть остановлено за счет капиллярных сил, но такое явление происходит только в пенах с очень тонкой пузырьковой оболочкой [17]. В результате обеднения жидкостью стенки пузырьков верхнего слоя становятся очень тонкими и неустойчивыми к механическому воздействию. При таком рассмотрении механизма разрушения пены при термическом воздействии становится очевидно, что процесс разрушения пены лимитирует истечение жидкости, а не нагревание пены до определенной температуры.

У пузырьков верхнего слоя под действием гравитационных сил жидкость скапливается в нижней части межпленочного пространства, что приводит к утончению верхней части пленки. Утончение пленки происходит также в результате испарения жидкости. Под действием теплового потока и напора газов тонкая пленка рвется, и пузырек разрушается. Выделившаяся влага проникает в межпленочное пространство следующего слоя пены, вытесняя из нее жидкость. Процесс повторяется заново. При таком механизме температурному воздействию подвергается одна и та же жидкость. Таким образом, при разрушении пены на ее поверхности должен образовываться достаточно тонкий разогретый слой.

Для подтверждения действия второго механизма разрушения пены и определения толщины прогретого слоя была установлена термопара в нижней части пены.

В результате было выявлено, что при толщине слоя пены 13 см в начале эксперимента повышение температуры фиксировалось, когда толщина остаточного слоя пены составляла 4...5 мм (табл. 4), что значительно меньше, чем указано в работе [9], где предполагалось, что прогревается от 30 до 50 % от общего объема пены.

Температура прогретого слоя составляла 50...58 °С, что значительно ниже температуры потери пенообразующей способности используемого пенообразователя, которая была определена отдельно и составила 95...98 °С.

Таким образом, можно утверждать, что процесс разрушения пены лимитирует скорость проникновения жидкости, выделившейся в результате разрушения пены, в нижележащие слои.

Таблица 4. Измерение температуры в нижней части пены

Table 4. Measurement of temperature at the bottom of foam

Кратность пены Foam expansion ratio	Время полного разрушения пены, с Foam complete destruction time, s	Температура жидкости после полного разрушения пены. °С Liquid temperature after complete destruction of foam, °C	Толщина нагретого слоя, мм Heated layer thickness, mm
10	92	54	8
20	66	50	5
30	46	52	5
40	40	57	4
50	37	58	4

Ранее такой эффект наблюдался нами при стабилизации пены натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы [21]. Из-за повышенной вязкости жидкой фазы она не успевала пройти по пенным каналам при разрушении пены, в результате чего скапливалась на поверхности пены, защищая ее от разрушения.

Рассматривая процесс разрушения пены с позиций действия второго механизма, высокую скорость разрушения пены кратностью более 50 в начале эксперимента можно объяснить быстрым нагревом и механическим разрушением пенных оболочек (см. табл. 1). Снижение скорости происходит по мере достижения такого объема жидкости, образовавшегося в результате разрушения пузырьков, который не успевает пройти по пенным каналам и скапливается в верхнем слое пены, в результате чего снижается ее скорость разрушения.

Заключение

Исследование закономерностей разрушения пены при температурном воздействии позволило установить, что ее разрушение лимитируется скоростью обеднения верхних слоев жидкостью. Соответственно удержание влаги в верхнем слое пены позволит значительно повысить ее устойчивость в условиях термического воздействия.

Огнетушащая эффективность пены, выраженная в минимальной интенсивности подачи пенообразующего раствора, зависит от вклада двух процессов: синерезиса и механического разрушения пены вследствие минимальной толщины пенной пленки. В условиях эксперимента минимальный вклад данных процессов наблюдался для пены кратностью 50. В реальных условиях пожара можно ожидать другое значение кратности пены, что открывает поле для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чайковский Е.В. Огонь и «Натиск» // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2006. Т. 15. № S2. С. 20–22.
2. Taylor R.G. Technical report 98: Compressed air foam systems in limited staffing conditions. Morristown, New Jersey : Morristown Fire Bureau, 1998. Pp. 75–112.
3. Ольховский И.А., Фещенко А.Н., Меженев В.А., Скворцов С.С. Способ определения кратности пены при подаче из воздушно-пенных и лафетных стволов с пенными насадками // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 4. С. 57–61. DOI: 10.25257/FE.2019.4.57-61
4. Гайнуллина Е.В., Якубова Т.В., Кректунов А.А. Исследование возможности улучшения огнетушащих свойств воздушно-механических пен // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1–1 (6). С. 78–80.
5. Exerowa D., Kruglyakov P.M. Foam and foam films — theory, experiment, applications. Amsterdam : Elsevier Science B.V., 1998. 773 p. DOI: 10.1016/s1383-7303(98)x8001-4
6. Kruglyakov P.M. Equilibrium properties of free films and stability of foams and emulsions // Thin Liquid Films. New York : Marcel Dekker, 1988. Pp. 767–818.
7. Murray B.S. Stabilization of bubbles and foams // Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2007. Vol. 12. Issues 4–5. Pp. 232–241. DOI: 10.1016/j.cocis.2007.07.009
8. Пашковский П.С. Температурные условия устойчивого пенообразования на сетках // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2018. № 3 (55). С. 19–27.
9. Воевода С.С., Шароварников А.Ф., Бастриков Д.Л., Крутов М.А. Влияние факторов пожара на огнетушащую эффективность пленкообразующих пенообразователей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 10. С. 63–65.
10. Кругляков П.М., Ексерова Д.Р. Пена и пенные пленки. М. : Химия, 1990. 432 с.
11. 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
12. Артемьев Н.С., Подгруппный А.В., Опарин Д.Е. Коэффициент разрушения воздушно-механической пены средней кратности при тушении жидкости в резервуаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2007. Т. 16. № 1. С. 82–83.
13. Guan J.-L., Yu Z.-F., Kuang K.-Q., Xiao X.-K., Hu C. Large petrochemical reservoir fire characteristics and emergency rescue forces needs analysis // 2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 2014. Pp. 322–326. DOI: 10.1109/ICICTA.2014.85
14. Sheng Y., Jiang J., Lu S., Li C. Fluorinated and fluorine-free firefighting foams spread on heptane surface // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. Vol. 552. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.05.004
15. Бочаров В.В., Раевская М.В. Использование перфторированных ПАВ в пенообразователях – «второе пришествие» галогенорганики с наихудшим сценарием развития для обитателей земли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 10. С. 75–82.
16. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Трегубов Д.Г. Экспериментальное исследование скорости выгорания и условий тушения модельного очага пожара класса в при поочередном применении гранулированного пеностекла и гелеобразующего огнетушащего вещества // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2018. Т. 1. № 2 (6). С. 70–78. DOI: 10.33269/nvcs.2018.2.70-78
17. Вилкова Н.Г. Свойства пен и методы их исследования : монография. Пенза, 2014. 120 с.
18. Кругляков П.М., Кочубей Н.В., Кузнецова Л.Л. О взаимосвязи внутреннего разрушения пены и уменьшения ее объема // Коллоидный журнал. 1983. Т. 45. № 5. С. 893–900.
19. Канн К.Б. Капиллярная гидродинамика пен. Новосибирск : Наука, 1989. 167 с.
20. Princen H.M. Gravitational syneresis in foams and concentrated emulsions // Journal of Colloid and Interface Science. 1990. Vol. 134. Issue 1. Pp. 188–197. DOI: 10.1016/0021-9797(90)90266-q
21. Кокшаров 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.
22. Demitri C., Giuri A., Raucci M.G., Giugliano D., Madaghiele M., Sannino A. et al. Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing // Interface Focus. 2014. Vol. 4. Issue 1. P. 20130053. DOI: 10.1098/rsfs.2013.0053

REFERENCES

1. Chaikovskii E.V. Fire and "Onslaught". *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2006; 15(S2):20-22. (rus.).
2. Taylor R.G. *Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions*. Morristown, New Jersey, Morristown Fire Bureau, 1998; 75-112.
3. Olkhovsky I.A., Feschenko A.N., Mezhenov V.A., Skvortsov S.S. Method for determining foam expansion when delivering from foam cannons and monitors with foam nozzles. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2019; 4:57-61. DOI: 10.25257/FE.2019.4.57-61
4. Gainullina E.V., Yakubova T.V., Krektunov A.A. Investigation of the possibility of improving the fire extinguishing properties of air-mechanical foams. *Modern Technologies for Civil Defense and Emergency Response*. 2015; 1-1(6):78-80. (rus.).
5. Exerowa D., Kruglyakov P.M. *Foam and Foam Films – Theory, Experiment, Applications*. Amsterdam, Elsevier Science B.V., 1998; 773. DOI: 10.1016/s1383-7303(98)x8001-4
6. Kruglyakov P.M. *Equilibrium Properties of Free Films and Stability of Foams and Emulsions*. Thin Liquid Films. New York, Marcel Dekker, 1988; 767-818.
7. Murray B.S. Stabilization of bubbles and foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2007; 12(4-5):232-241. DOI: 10.1016/j.cocis.2007.07.009
8. Pashkovskiy P.S. Temperature conditions of the steady foaming on nets. *Scientific Bulletin of the NIIGD "Respirator"*. 2018; 3(55):19-27. (rus.).
9. Voevoda S.S., Sharovarnikov A.F., Bastrikov D.L., Krutov M.A. Influence of fire factors on the extinguishing efficiency of film-forming foaming agents. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(10):63-65. (rus.).
10. Kruglyakov P.M., Ekserova D.R. *Foam and Foam Films*. Moscow, Khimiya Publ., 1990; 432. (rus.).
11. 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
12. Artemyev N.S., Podgrushnyy A.V., Oparin D.E. The destruction coefficient of the air-mechanical foam of medium multiplicity by extinguishing the liquid in the tank. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 16(1):82-83. (rus.).
13. Guan J.-L., Yu Z.-F., Kuang K.-Q., Xiao X.-K., Hu C. Large petrochemical reservoir fire characteristics and emergency rescue forces needs analysis. *2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2014; 322-326. DOI: 10.1109/ICICTA.2014.85
14. Sheng Y., Jiang J., Lu S., Li C. Fluorinated and fluorine-free firefighting foams spread on heptane surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018; 552:1-8. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.05.004
15. Bocharov V.V., Raevskaya M.V. The increased use of perfluorinated surfactants – "second coming" of organohalogen compounds with the worst scenario of development for inhabitants of Earth. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(10):75-82. (rus.).
16. Dadashov I., Kirieiev O., Trehubov D. Experimental research of burn rate and terms of extinguishing of standardized fire source of class b by consistent application of granular foam glass and gel-forming extinguishant. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2018; 1:2(6):70-78. DOI: 10.33269/nvcs.2018.2.70-78 (rus.).
17. Vilkova N.G. *Properties of Foams and Methods of Their Research: the Monograph*. Penza, 2014; 120. (rus.).
18. Kruglyakov P.M., Kochubey N.V., Kuznetsova L.L. About the interconnection of internal destruction of the foam and decrease of its volume. *Colloid Journal of the USSR*. 1983; 45(5):893-900. (rus.).
19. Kann K.B. *Capillary Hydrodynamics of Foams*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989; 167. (rus.).
20. Princen H.M. Gravitational syneresis in foams and concentrated emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1990; 134(1):188-197. DOI: 10.1016/0021-9797(90)90266-q
21. Koksharov A.V., Markov V.F., Buchelnikov D.Yu., Terentyev V.V. Stabilization of high density foams sodium salt of carboxymethylcellulose. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(10):79-83. (rus.).
22. Demitri C., Giuri A., Raucci M.G., Giugliano D., Madaghiele M., Sannino A. et al. Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing. *Interface Focus*. 2014; 4(1):20130053. DOI: 10.1098/rsfs.2013.0053

Поступила 14.04.2020, после доработки 22.05.2020;

принята к публикации 28.05.2020

Received April 14, 2020; Received in revised form May 22, 2020;

Accepted May 28, 2020

Информация об авторах

КОКШАРОВ Александр Викторович, канд. хим. наук, доцент кафедры пожаротушения и аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация; Author ID: 182341, ORCID: 0000-0003-4628-7644; e-mail: koksharovab@e1.ru

ОСИПЕНКО Сергей Игоревич, старший преподаватель кафедры пожаротушения и аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация; Author ID: 1011020, ORCID: 0000-0003-0117-3547; e-mail: angero07@rambler.ru

ГАЙНУЛЛИНА Елена Викторовна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры химии и процессов горения, Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация; Author ID: 1072896, ORCID: 0000-0002-8278-3111; e-mail: helen_vaytner@mail.ru

Information about the authors

Aleksandr V. KOKSHAROV, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of Department of Fire Fighting and Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation; Author ID: 182341, ORCID: 0000-0003-4628-7644; e-mail: koksharovab@e1.ru

Sergey I. OSIPENKO, Senior Lecturer of Department of Fire Fighting and Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation; Author ID: 1011020, ORCID: 0000-0003-0117-3547; e-mail: angero07@rambler.ru

Elena V. GAYNULLINA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Chemistry and Combustion Processes, Ural Institute of State Fire Service of Emercom of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation; Author ID: 1072896, ORCID: 0000-0002-8278-3111; e-mail: helen_vaytner@mail.ru