

Е. И. ХИЛЬ, адъюнкт кафедры общей и специальной химии, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: gpslab@yandex.ru)

А. Ф. ШАРОВАРНИКОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

УДК 614.84.664

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОГNETУШАЩУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕНЫ НИЗКОЙ КРАТНОСТИ

Рассматривается тушение пожаров нефти и нефтепродуктов на объектах нефтяной отрасли, в частности тушение пламени нефти и нефтепродуктов пеной, полученной из пенообразователей различной природы. Проведена серия сравнительных испытаний по определению огнетушащей эффективности пены, полученной из различных фторсодержащих пенообразователей. Исследованы пенообразователи как отечественных, так и зарубежных производителей; определена их огнетушащая эффективность. Получены сравнительные данные по критической и оптимальной интенсивностям подачи пены для всех исследованных пенообразователей. Показано, что полученные результаты можно использовать при обеспечении пожарной безопасности на объектах нефтяной отрасли и для более эффективного тушения пожаров на этих объектах. Сделан вывод о наличии минимума на кривых зависимости удельного расхода водных растворов всех исследованных пенообразователей от интенсивности подачи пены, что позволяет определять оптимальную интенсивность подачи пены, необходимую для успешного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: пенообразователь; тушение нефти и нефтепродуктов; оптимальная интенсивность; эффективность тушения; поверхностное натяжение; коэффициент растекания.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.69-74

Для тушения пожаров нефтепродуктов, особенно с температурой вспышки ниже 28 °С, рекомендуется использовать фторсодержащие пенообразователи [1]. Наиболее надежной характеристикой природы фторсодержащих пенообразователей являются изотермы поверхностного и межфазного натяжения водного раствора на границе с углеводородом. Обычно в качестве эталонного нефтепродукта используют гептан нормального строения, поэтому, прежде чем приступить к экспериментальным исследованиям огнетушащей эффективности, проверяют поверхностную активность рабочих водных растворов на границе с гептаном.

Цель данной работы — провести сравнительное испытание огнетушащей эффективности пены, полученной из различных фторсодержащих пенообразователей, и попытаться количественно описать модель процесса тушения.

Экспериментальные измерения огнетушащей эффективности пены при подаче ее в слой углеводорода и методика измерения поверхностного и межфазного натяжения приведены в ГОСТ Р 53280.2–2010.

Авторы при проведении экспериментов использовали другую методику, отличительной особенно-

стью которой является исследование процесса тушения пламени жидкости в широком диапазоне интенсивностей подачи пены, а при измерении поверхностного и межфазного натяжений — в широком диапазоне концентраций пенообразователей. Это позволило выявить область концентраций, в которой водные растворы способны самопроизвольно растекаться по поверхности углеводорода, и определить оптимальную интенсивность подачи пены при тушении пламени горючей жидкости. В качестве горючей жидкости использовали индивидуальный предельный углеводород — *n*-гептан.

Экспериментальные исследования начинали с измерений поверхностного и межфазного натяжения и расчета на их основе коэффициента растекания водного раствора по гептану. Для расчета использовали известное соотношение [2, 3]:

$$K_{10} = \sigma_0 - (\sigma_1 + \sigma_{10}), \quad (1)$$

где K_{10} — коэффициент растекания раствора по углеводороду;

σ_0 , σ_1 , σ_{10} — поверхностное натяжение соответственно горючей жидкости, водного раствора и на границе раствора с углеводородом.

Для приготовления водных растворов использовали пенообразователи “Light Water FC-201”, “Shtamex AFFF”, “Chemgard AFFF C-133”, “Ultraguard AR-AFFF”, “Шторм Ф” и “Подслойный”.

Вначале для выбора концентрации, при которой коэффициент растекания становится больше нуля, строили изотермы поверхностного и межфазного натяжений, а затем проводили эксперименты по тушению пламени подачей пены с различной интенсивностью.

В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены результаты исследований водных растворов и пены на основе пенообразователя “Light Water FC-201”. Этот пенообразователь является образцом среди фторсодержащих составов. Судя по результатам измерений, растворы пенообразователя, начиная с концентрации 1,0 %, приобретают положительный коэффициент растекания и способность к самопроизвольному растеканию по поверхности гептана. По экспериментальным результатам, представленным в виде кривых зависимости удельного расхода и времени тушения от интенсивности подачи пены, определены критическая ($J_{кр}$) и оптимальная ($J_{опт}$) интенсивности, а также минимальный удельный расход раствора пенообразователя при тушении пламени гептана.

Результаты тушения пламени гептана пеной низкой кратности, полученной из растворов пенообразователей “Light Water FC-201”, “Shtamex AFFF”, “Chemgard AFFF C-133” и “Ultraguard AR-AFFF”, представлены на рис. 3. Использовали пену кратностью $7,0 \pm 0,5$.

Результаты испытаний огнетушащей эффективности различных пленкообразующих пенообразователей показали (см. таблицу), что критическая ин-

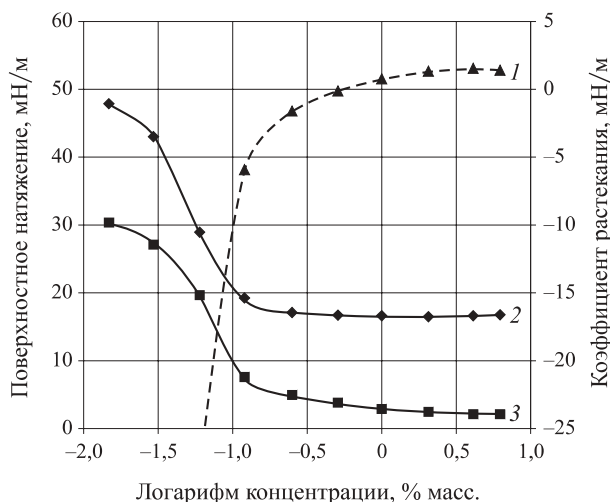


Рис. 1. Зависимость коэффициента растекания раствора пенообразователя по гептану (1), поверхностного (2) и межфазного (3) натяжения раствора на границе с гептаном от концентрации раствора пенообразователя “Light Water FC-201”

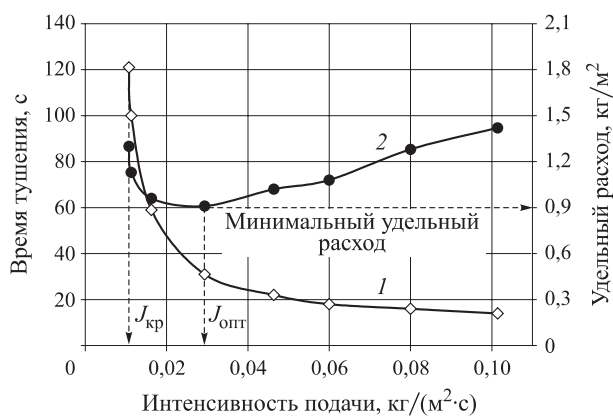


Рис. 2. Зависимость времени тушения пламени гептана (1) и удельного расхода пенообразователя “Light Water FC-201” (2) от интенсивности подачи пены

тенсивность подачи пены на их основе примерно одинакова, а значения минимального удельного расхода пенообразователей существенно различаются. Наиболее эффективным оказался пенообразователь “Light Water FC-201” с минимальным удельным расходом 0,95 кг/м², затем “Shtamex AFFF” — 1,2 кг/м², далее “Ansulite” — 1,5 кг/м² и, наконец, “Подслойный” — 2,5 кг/м².

Оптимальная интенсивность подачи пены снизилась с 0,05 кг/(м²·с) для пенообразователя “Подслойный” до 0,03 кг/(м²·с) для пенообразователя “Light Water FC-201”. Необходимо отметить, что наклон

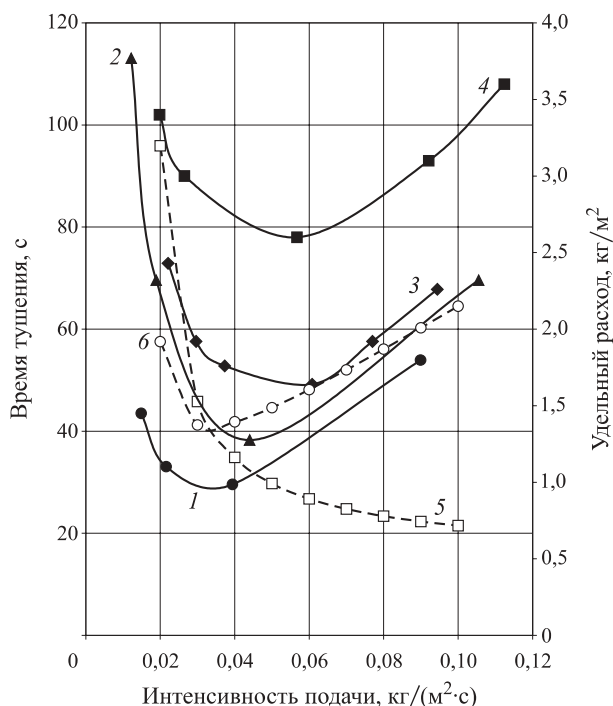


Рис. 3. Зависимость времени тушения гептана на основе пенообразователей “Light Water FC-201” (1), “Shtamex AFFF” (2), “Ansulite” (3) и “Подслойный” (4), полученного экспериментально и расчетом по формуле (4) (5), а также удельного расхода пенообразователя, рассчитанного по формуле (5) (6), от интенсивности подачи пены

Сводная таблица результатов тушения пламени гептана пеной на основе пенообразователей "Light Water FC-201", "Shtamex AFFF", "Ansulite" и "Подслойный"

Пенообразователь	Интенсивность подачи, кг/(м ² ·с)		Минимальный удельный расход, кг/м ²	Соотношение $J_{опт}/J_{кр}$
	критическая	оптимальная		
Light Water FC-201	0,015	0,03	0,95	2,3
Shtamex AFFF	0,02	0,045	1,2	2,3
Ansulite	0,02	0,05	1,5	2,5
Подслойный	0,02	0,055	2,5	2,7

восходящих ветвей кривых удельного расхода приблизительно одинаков. На основании анализа результатов экспериментальных исследований получены сравнительные данные по минимальному удельному расходу, критической и оптимальной интенсивностям подачи пены.

Анализ материального баланса пены, поданной в резервуар на тушение пламени, позволяет получить расчетную формулу для определения времени тушения и удельного расхода пенообразователя [4–9]:

$$\tau_T = -\frac{\rho_f h_s}{2U_0} \left[1 + \left(\frac{J}{U_0} \right)^m \right] \ln \left(1 - \frac{U_0}{J} \right), \quad (2)$$

где ρ_f — плотность пены, кг/м³;
 h_s — минимальная толщина слоя пены, определяемая величиной сдвигового напряжения, м;
 U_0 — удельная скорость термического разрушения пены, кг/(м²·с);
 J — интенсивность подачи пены, кг/(м²·с);
 m — показатель степени, учитывающий характер нарастания толщины слоя пены в зависимости от интенсивности ее подачи.

Выражение для расчета удельной скорости термического разрушения пены и, соответственно, критической интенсивности подачи имеет вид:

$$U_0 = U_\Gamma q_\Gamma / (z q_B), \quad (3)$$

где U_Γ — удельная скорость испарения, кг/(м²·с);
 q_Γ — удельная теплота испарения углеводорода, кДж/кг;
 z — коэффициент, учитывающий форму пузырьков пены, кг/м²;
 q_B — удельная теплота испарения воды, кДж/кг.

Из формулы (2) следует, что время тушения $\tau_T \rightarrow \infty$. При $J = U_0 \equiv J_{кр}$ в формуле (2) заменим U_0 на $J_{кр}$ и преобразуем ее к виду:

$$\tau_T = -\frac{\rho_f h_s}{J_{кр}} \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^m \right] \ln \left(1 - \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (4)$$

Соответственно, для расчета удельного расхода пены ($Q = J\tau_T$) получена формула

$$Q = -J \frac{\rho_f h_s}{J_{кр}} \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^m \right] \ln \left(1 - \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (5)$$

На рис. 4 приведены результаты расчета времени тушения и удельного расхода пенообразователя по формулам соответственно (4) и (5) при фиксированной критической интенсивности подачи пены. Как следует из рис. 3, форма кривых удельного расхода определяется темпом изменения толщины слоя пены в месте ее падения по мере роста интенсивности ее подачи. Модель тушения пламени пеной изменяли, задавая эту зависимость от линейной (показатель степени 1,0) до кубического корня (показатель степени 0,3). По мере снижения величины показателя степени характер кривых зависимости удельного расхода от интенсивности подачи пены постепенно изменялся. Одновременно смещалось положение минимума, наличие которого указывает на оптимальную интенсивность подачи пены.

Сопоставление результатов исследований с существующей теорией, описывающей процесс тушения пеной, показало удовлетворительное совпадение с выводами работ [10–14], в которых соотношение

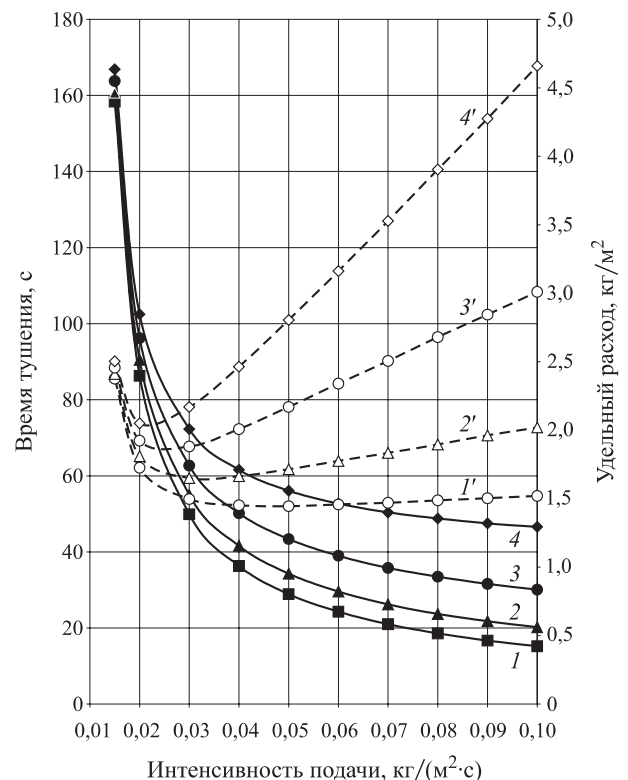


Рис. 4. Зависимость времени тушения (1–4) и удельного расхода пенообразователя (1'–4') от интенсивности подачи пены при переменном показателе степени: 1, 1' — $m = 0,3$; 2, 2' — $m = 0,5$; 3, 3' — $m = 0,75$; 4, 4' — $m = 1,0$

между оптимальной и критической интенсивностями описывается формулой

$$J_{\text{опт}} = 2,5J_{\text{кр}} \quad (6)$$

Сопоставление результатов эксперимента с модельными представлениями о процессе тушения пламени пеной подтвердило предположение о том, что толщина пенного слоя линейно связана с интенсивностью подачи пены. Из экспериментов выявлено соотношение между оптимальной и критической

интенсивностями, которое оказалось близким к теоретическому значению, равному 2,5, и колеблется от 2,2 до 2,7.

Основной вывод, который был сделан из проведенных экспериментов для всех исследованных пенообразователей, — это наличие минимума на кривых зависимости удельного расхода водного раствора пенообразователя от интенсивности подачи пены, что позволяет определять оптимальную интенсивность подачи пены при тушении пламени нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н.* Лабораторная методика определения изолирующих свойств пены на поверхности гептана // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2014. — Т. 23. № 4. — С. 72–76.
2. *Шароварников А. Ф., Пунчик Г. И.* Экспериментальное определение прочности высокократных пен // *Коллоидный журнал*. — 1982. — Т. 44, № 1. — С. 98–101.
3. *Bikerman J. J.* Foams. — New York : Springer, 1973. DOI: 10.1007/978-3-642-86734-7.
4. *Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A.* Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // *Applied Mechanics and Materials*. — 2013. — Vol. 475-476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
5. *Дегаев Е. Н., Корольченко Д. А.* Зависимость огнетушащей эффективности пенообразователей для тушения пожаров от структуры коэффициента растекания рабочего раствора по углеводороду // *Международная научно-техническая конференция “Безопасность и проектирование конструкций в машиностроении”*: сб. науч. тр. — Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. — С. 53–56.
6. *Дегаев Е. Н., Корольченко Д. А.* Нормирование кратности пены при испытании пенообразователей по ГОСТ Р 53280.2–2010 // *1-я Международная научно-техническая конференция “Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы — перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов”*: сб. науч. тр. — Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. — С. 52–55.
7. *Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А.* Тушение горючих жидкостей распыленной водой // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 11. — С. 70–74.
8. *Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А.* Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 69–74.
9. *Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф.* Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2014. — Т. 23, № 11. — С. 84–88.
10. *Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О.* Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // *Вестник МГСУ*. — 2011. — № 1–2. — С. 331–335.
11. *Блинов В. И., Худяков Г. Н.* Диффузионное горение жидкостей. — М. : АН СССР, 1961. — 208 с.
12. *Петров И. И., Реутт В. Ч.* Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Изд. МКХ РСФСР, 1961. — 143 с.
13. *Rasbash D. J.* The extinction of fire with plain water: a review // *Fire Safety Science*. — 1986. — Vol. 1. — P. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
14. *Горшков В. И.* Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Пожнаука, 2007. — 267 с.

Материал поступил в редакцию 9 ноября 2015 г.

Для цитирования: *Хиль Е. И., Шароварников А. Ф.* Влияние природы пенообразователей на огнетушащую эффективность пены низкой кратности // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2016. — Т. 25, № 1. — С. 69–74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.69-74.

INFLUENCE OF THE FOAMERS NATURE ON FIRE EXTINGUISHING EFFECTIVENESS OF FOAM OF LOW FREQUENCY RATE

KHIL E. I., Postgraduate Student of General and Special Chemistry Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129336, Russian Federation; e-mail address: gpslab@yandex.ru)

SHAROVARNIKOV A. F., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

The article gives a review of extinguishing fires of oil and oil products at oil production facilities, in particular extinguishing flames of oil and oil products with fire extinguishing foam, produced from foam forming agents of various nature. The objective of this work was to conduct a series of comparative tests to determine fire extinguishing efficiency of foam, produced from various fluorine containing foam forming agents. As a result, there were studied foam forming agents of both domestic and foreign manufacturers as well as fire extinguishing efficiency of those foam forming agents was identified. Based on the results of the experimental studies comparative data regarding critical and optimal intensity of foam supply for all foam forming agents under the study was obtained. The data obtained can be used to provide fire protection at oil production facilities and for more efficient fire extinguishing at those facilities. Main conclusion from the tests conducted is availability of minimum specific flow of foam forming agent aqueous solution based on the intensity of foam supply for all foam forming agents under study which allows to identify optimal intensity of foam supply, necessary for successful fire extinguishing of oil and oil products.

Keywords: foam forming agent; fire extinguishing of oil and oil products; optimal intensity; efficiency of extinguishing; surface tension; spreading coefficient.

REFERENCES

1. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N. Laboratornaya metodika opredeleniya izoliruyushchikh svoystv peny na poverkhnosti heptana [Laboratory standard technique for insulating properties of foam on heptane surface]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 72–76.
2. Sharovarnikov A. F., Punchik G. I. Eksperimentalnoye opredeleniye prochnosti vysokokratnykh pen [Experimental determination of the strength of foams with a high foam-to-liquid volume ratio]. *Kolloidnyy zhurnal — Colloid Journal*, 1982, vol. 44, no. 1, pp. 98–101.
3. Bikerman J. J. *Foams*. New York, Springer, 1973. DOI: 10.1007/978-3-642-86734-7.
4. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475-476, pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
5. Degaev E. N., Korolchenko D. A. Zavisimost ognetushashchey effektivnosti penoobrazovatelye dlya tusheniya pozharov ot struktury koeffitsienta rastekaniya rabocheho rastvora po uglevodorodu [Dependence of fire extinguishing effectiveness of foamers for suppression of the fires from structure of a spreading coefficient of working solution on hydrocarbon]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Bezopasnost i proyektirovaniye konstruksiy v mashinostroyenii”*: sb. nauch. tr. [International Scientific and Technical Conference “Safety and projection of designs in mechanical engineering”. Collected scientific papers]. Kursk, Southwest State University Publ., 2015, pp. 53–56.
6. Degaev E. N., Korolchenko D. A. Normirovaniye kratnosti peny pri ispytanii penoobrazovatelye po GOST R 53280.2–2010 [Rationing of frequency rate of foam at test of foamers in accordance with GOST R 53280.2–2010]. *1-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Metalloobrabatyvayushchiye komplekxy i robototekhnicheskiye sistemy — perspektivnyye napravleniya nauchno-issledovatel'skoy deyatel'nosti molodykh uchenykh i spetsialistov”*: sb. nauch. tr. [1st International Scientific and Technical Conference “Metalworking complexes and robotic systems — the perspective directions of research activity of young scientists and experts”. Collected scientific papers]. Kursk, Southwest State University Publ., 2015, pp. 52–55.

7. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Tusheniye goryuchikh zhidkostey raspylennoy vodoy [Extinguishing of combustible liquid by atomized water]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 11, pp. 70–74.
8. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Vliyaniye dispersnosti kapel vody na effektivnost tusheniya pozharov goryuchey zhidkosti [Impact of dispersion of water drops on the efficiency of fire extinguishing of combustible liquid]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 69–74.
9. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Universalnost mekhanizmov tusheniya plameni razlichnymi ognetushashchimi veshchestvami [Universality of mechanisms of fire suppression by various extinguishing agents]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 13, pp. 84–88.
10. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 331–335.
11. Blinov V. I., Khudyakov G. N. *Diffuzionnoye goreniye zhidkostey* [Diffusion burning of liquids]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 1961. 208 p.
12. Petrov I. I., Reutt V. Ch. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Suppression of combustible liquids flame]. Moscow, Ministry of Utilities Sector Publ., 1961. 143 p.
13. Rasbash D. J. The extinction of fire with plain water: a review. *Fire Safety Science*, 1986, vol. 1, pp. 1145–1163. DOI: 10.3801/iafss.fss.1-1145.
14. Gorshkov V. I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing of combustible liquids' flame]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 267 p.

For citation: Khil E. I., Sharovarnikov A. F. Vliyaniye prirody penoobrazovateley na ognetushashchuyu effektivnost peny nizkoy kratnosti [Influence of the foamers nature on fire extinguishing effectiveness of foam of low frequency rate]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 69–74. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.69-74.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ ОТСЕКИ : учебное пособие.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 40 с. : ил.

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru