

А. Н. Фещенко

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: saver32@mail.ru)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТУШЕНИЯ СПИРТСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВ ПОДСЛОЙНЫМ СПОСОБОМ ПЕНОЙ РАЗЛИЧНОЙ КРАТНОСТИ

Проведена серия экспериментальных исследований для выявления закономерностей тушения спиртосодержащих топлив подслоиным способом пеной различной кратности. Получена эмпирическая зависимость, определяющая совокупное влияние кратности и интенсивности подачи пены на удельный расход рабочего раствора пенообразователя. Установлено влияние устойчивости пены к пеногашению на эффективность подслоиного пожаротушения.

Ключевые слова: подслоиное тушение, кратность пены, модельная горючая жидкость, оксигенаты.

Технический регламент таможенного союза **ТР ТС 013/2011¹** (далее – **ТР ТС**) определяет состав высокооктановых бензинов. Для повышения октанового числа и улучшения технических показателей в состав моторных топлив добавляют различные оксигенаты¹. Согласно ТР ТС, в качестве оксигенатов допускается применять низкомолекулярные спирты и эфиры. Известно, что при пожаротушении такого топлива возникают трудности, если применяется подслоиная система пожаротушения. Принципиальная возможность применения подслоиной системы изучалась в конце 90-х годов Шароварниковым С. А. [1]. Исследование проводилось с применением фторированных пенообразователей типа АFFF, требования, к составу которых в настоящее время изменены согласно международным соглашениям. Вместо перфторированного радикала с восьмью атомами углерода в производстве используются соединения, сочетающие в радикале шесть перфторированных углеродов и две углеводородные группы.

К пене низкой кратности относят пену, кратность которой лежит в широком диапазоне от 3 до 20 единиц. В существующих нормативных документах^{2,3} отсутствуют требования, конкретизирующие значения оптимальной кратности пены. Критерием выбора интенсивности является температура вспышки ($T_{всп}$). При $T_{всп} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже для подачи в слой пены на основе пленкообразующих пенообразователей минимальная интенсивность подачи рабочего раствора должна составлять $0,1\text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. При $T_{всп}$ более $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ интенсивность должна быть не менее $0,08\text{ л}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Однако многие исследования показывают существенное влияние именно кратности пены на эффективность пожаротушения нефти

¹Технический регламент таможенного союза ТР ТС 013/2011 "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту (с изм. 2 декабря 2015 г.)". Утв. решением комиссии таможенного союза от 18 октября 2011 года № 826: по состоянию на 1 дек. 2016 г.

²СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности;

³Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках М.: ГУГПС, ВНИИПО, МИПБ, 2000. 76 с.

и нефтепродуктов. Даже незначительное изменение кратности пены может существенно изменить требования к необходимым оптимальным для тушения показателям [2-4].

Целью данной работы является выявление на основе экспериментальных исследований влияния кратности пены на основные показатели подслоного пожаротушения спиртосодержащих моторных топлив. Исследование проводилось в несколько этапов.

На первом решалась задача по созданию модельных видов горючего топлива на основе прямогонного бензина. Чтобы выдержать соотношение "объёмная доля кислорода – массовая доля кислорода" для соответствия требованиям, которое устанавливается действующим техническим регламентом, предложена расчётная формула [5]. В качестве кислорода для создания модельных горючих топлив применялся изопропиловый спирт как наиболее агрессивный по отношению к пене из разрешенных к применению согласно ТР ТС. В результате получено четыре модельных топлива с различным содержанием изопропилового спирта (табл. 1).

Таблица 1

Модельные виды топлив

Модельное топливо	Соотношение компонентов в модельном топливе, % об.	
	Изопропиловый спирт	Прямогонный бензин
Топливо № 1	0,0	100,0
Топливо № 2	5,0	95,0
Топливо № 3	7,5	92,5
Топливо № 4	10,0	90,0

На втором этапе, после анализа существующих способов измерения кратности пены, решено воспользоваться методом, предложенным Тихомировым В. К., в основе которого лежит свойство изменения удельной электропроводности пены при изменении её кратности [6]. Существенным преимуществом данного способа является контроль кратности в процессе тушения. Наиболее распространённый весовой способ измерения кратности такого преимущества не даёт. Предложенная методика и установка для проведения испытаний по подслоному пожаротушению модельных топлив позволяет проводить изменение и осуществлять контроль кратности пены на протяжении всего процесса её подачи [7].

На следующем этапе производился выбор пенообразователей для исследований. Применялись фторсинтетические пенообразователи типа AFFF. Отбор производился по известной методике в лабораторных условиях [8], сущность которой заключается в оценке пенообразующей способности пенообразователей. Для этого определялась кратность пены из рабочего раствора пенообразователя с изопропиловым спиртом. По результатам проведённых экспериментов из четырёх исследованных пенообразователей отобрано два. Критерием послужил показатель устойчивости пены к пеногашению, который заключается в способности пены поддерживать свою кратность в присутствии спиртового

компонента. Это одно из обязательных условий успешного пожаротушения спиртосодержащих топлив подслоным способом, так как спирт из топлива в процессе подъёма пены через слой жидкости экстрагируется в рабочий раствор пенообразователя, находящийся в пене. Прямые испытания, где спирт непосредственно смешан с рабочим раствором пенообразователя перед получением воздушно-механической пены дают возможность прогнозирования интенсивности разрушения пены, полученной из этого пенообразователя при подъёме через слой спиртосодержащего топлива.

Затем проведена серия огневых испытаний. Для изменения интенсивности подачи использовались модельные очаги различной площади. Тушение проводилось в следующей последовательности: пенообразователем № 1 осуществлялось тушение всей линейки модельных топлив. При этом контролируемая в течение подачи кратность пены варьировалась от 2,5 до 7,5 единиц. Аналогичные тушения проводились с пенообразователем № 2. Часть результатов экспериментальных исследований продемонстрирована на рис. 1-2. На рис. 1 – тушение модельного топлива № 3 пенообразователем № 1, на рис. 2 – результаты тушения модельного топлива № 4 пенообразователем № 2.

Из рис. 1-2 видно, что графики зависимости времени тушения от интенсивности подачи, несмотря на различное содержание спирта в модельном топливе, имеют схожий характер. Значения интенсивности в интервале от 0,04 до 0,06 кг/м²·с близки к критическим, то есть при дальнейшем её снижении время резко возрастает и тушение не происходит. При интенсивности более 0,12 кг/м²·с кривые выполаживаются и повышение интенсивности практически не влияет на изменение времени тушения. Графики удельного расхода имеют экстремальный вид. Кривые смещаются при увеличении кратности, влияние которой не имеет линейной зависимости.

Для модельного топлива № 3 (при тушении пенообразователем № 1) и для модельного топлива № 4 (при тушении пенообразователем № 2) наиболее оптимальные показатели основных параметров тушения наблюдаются при значениях кратности в интервале к 5-6. При значениях кратности больших или меньших указанного интервала происходит увеличение удельного расхода. Таким образом, зависимость минимального удельного расхода от кратности пены тоже имеет экстремальный характер.

По результатам экспериментальных исследований проведён регрессионный анализ. Получены уравнения (1), (2) для пенообразователей № 1 и № 2 соответственно.

$$Q(K, C) = 15,47 - 4,208K + 0,9267C + 0,4139K^2 - 0,1166 KC + 0,0954 C^2; \quad (1)$$

$$Q(K, C) = 14,4 - 4,263K + 0,2411C + 0,4211K^2 - 0,0289 KC + 0,0412 C^2, \quad (2)$$

где Q – удельный расход;

C – концентрация спиртового компонента;

K – кратность пены.

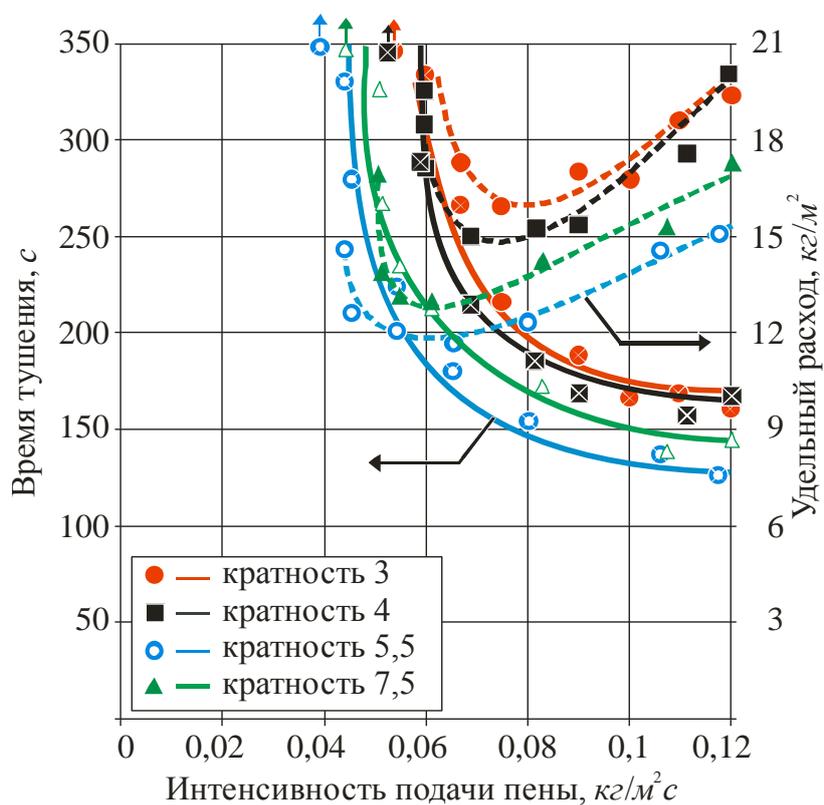


Рис. 1. Зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены и удельного расхода при тушении модельного топлива № 3 пенообразователем № 1 (стрелками показано, к какой оси ординат относятся кривые)

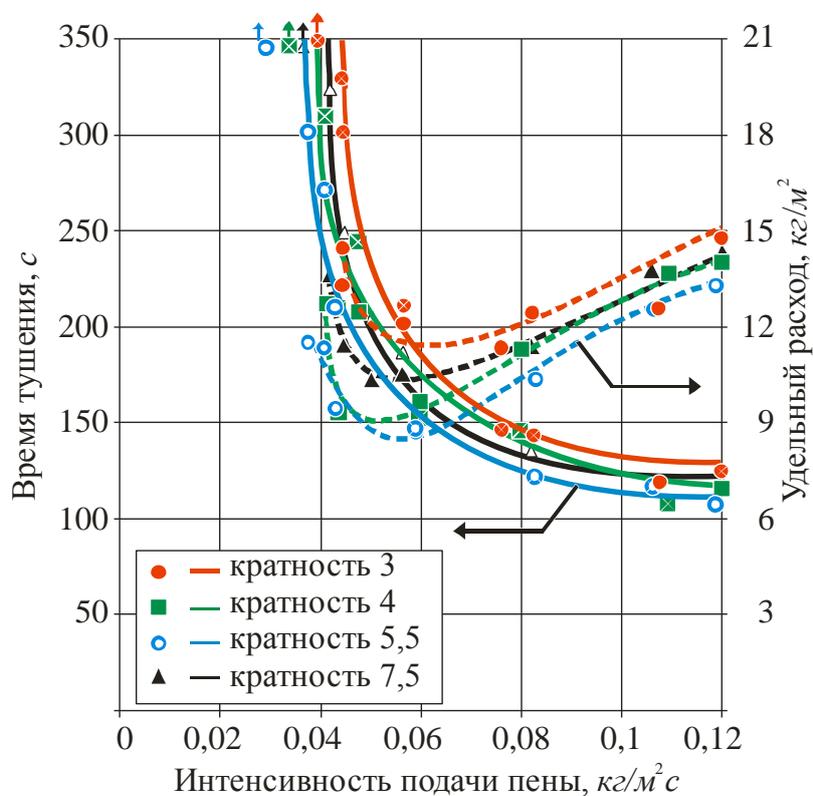


Рис. 2. Зависимости времени тушения от интенсивности подачи пены и удельного расхода при тушении модельного топлива № 4 пенообразователем № 2 (стрелками показано, к какой оси ординат относятся кривые)

Используя программное обеспечение *MATLAB*, по уравнениям (1), (2) построены трёхмерные поверхности $Q(K, C)$, которые представлены на рис. 3, 4. Точками обозначены фактические значения минимального удельного расхода для каждой серии экспериментов.

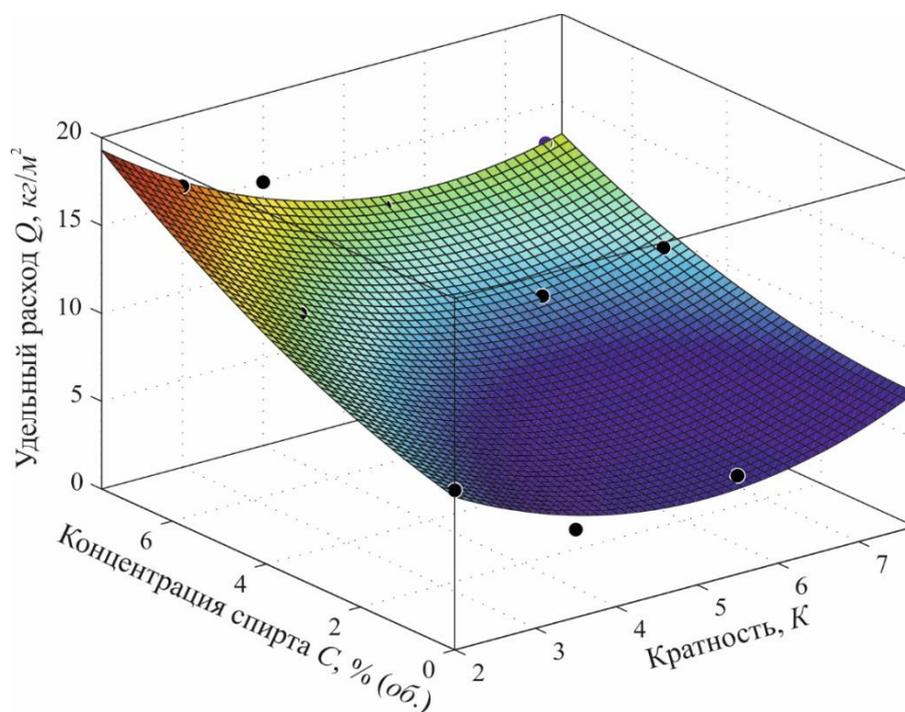


Рис. 3. Зависимость минимального удельного расхода от кратности пены и концентрации спиртового компонента в модельном топливе при тушении пенообразователем № 1

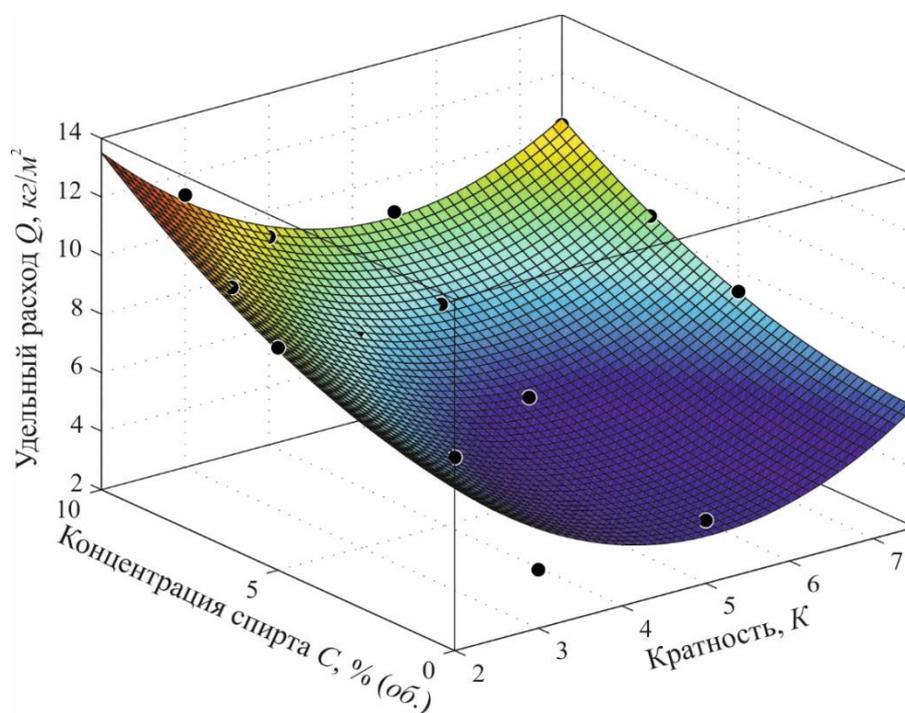


Рис. 4. Зависимость минимального удельного расхода от кратности пены и концентрации спиртового компонента в модельном топливе при тушении пенообразователем № 2

Представленные на рис. 3 и 4 поверхности удовлетворительно совпадают с результатами экспериментальных исследований. Среднее квадратичное отклонение уравнений (1) и (2) не превышает 0,97 и 0,92 соответственно. Поэтому их можно использовать для определения минимального удельного расхода в границах кратности от 2 до 8 и концентрации спирта от 0 до 10 % (об.).

Как видно из рис. 3 и 4, при повышении доли спирта в модельном топливе значения минимального удельного расхода смещаются в сторону увеличения кратности. При значениях кратности, лежащих в диапазоне от 2,5 до 4, процесс подъёма пены через слой жидкости затруднён, время контакта с горючей жидкостью увеличивается. Часть раствора пенообразователя достаточно быстро истекает из пены и осаждается. Такая кратность подходит для тушения модельных топлив с процентным содержанием спирта от 0 до 5 %, так как способствует истечению раствора из пены и образованию плёнки на поверхности горючей жидкости, что уменьшает относительно "длительный" подъём.

При увеличении кратности выше указанных значений, пена быстрее всплывает через слой жидкости, время контакта с топливом уменьшается, однако, и истечение раствора из жидкости происходит за более длительное время, поэтому при тушении модельных топлив с содержанием спирта от 0 до 5 %, увеличивается время покрытия поверхности горючей жидкости. Иначе происходит при тушении с содержанием спирта более 5 %. Плёнка на поверхности не образуется, поэтому более эффективна кратность в диапазоне от 5 до 6. При увеличении кратности выше указанного значения, увеличивается вязкость и энергия сдвига, пена дольше покрывает поверхность.

Выводы

1. Выявлено, что при увеличении доли спирта в горючей жидкости от 0 до 10 %, для минимизации удельного расхода оптимальный диапазон кратности пены должен смещаться в область больших величин с 3-4 до 5-6 соответственно.

2. Получена эмпирическая зависимость, определяющая совокупное влияние кратности и интенсивности подачи пены на удельный расход рабочего раствора пенообразователя при подслоном тушении модельных топлив с различной концентрацией спирта.

Литература

1. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. М.: Калан, 2002. 448 с.
2. Безродный И. Ф. Забытые имена – забытые знания... или "Почему не тушит пена?.." // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 12. С. 49-55.
3. Котов А. А., Петров И. И., Реутт В. Ч. Применение высокократной пены при тушении пожаров. М.: Стройздат, 1972. 113 с.
4. Хиль Е. И., Макарова И. П., Шароварников А. Ф. Влияние кратности пены на эффективность тушения пламени нефтепродуктов подачей пены в основание резервуара // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2016. № 1. С. 48-50.
5. Феценко А. Н., Макаров С. А., Рахманин О. К. Особенности выбора модельной горючей жидкости для исследования процесса тушения пожаров углеводородно-спиртовых топлив // Технологии техносферной безопасности. 2017. Вып. 2 (72). С. 135-139. <http://academygps.ru/ttb>.
6. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 264 с.
7. Феценко А. Н., Макаров С. А., Третьяков А. В., Молчанов В. П., Воевода С. С. Определение кратности пленкообразующей пены для подслоного тушения пожаров горючих жидкостей // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 9. С. 65-73. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.65-73.
8. Феценко А. Н., Рахманин О. К. Определение пригодности пенообразователей для подслоного пожаротушения спиртосодержащих нефтепродуктов // Матер. VII междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов "Проблемы техносферной безопасности – 2018". М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. С. 37-40.

Материал поступил в редакцию 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Феценко А. Н. Закономерности тушения спиртосодержащих топлив подслоным способом пеной различной кратности // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 1 (83). – 2019. – С. 42-49. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.42-49.

A. N. Feshchenko

REGULARITIES OF EXTINGUISHING ALCOHOL-CONTAINING FUELS BY THE SUBSURFACE METHOD USING FOAM OF VARIOUS EXPANSION

The purpose of the work is to identify the regularities of the effect of foam expansion on the main indicators of the subsurface fire extinguishing of alcohol-containing motor fuels on the basis of experimental studies. To achieve this goal experimental studies were carried out using AFFF foaming agent, characterized by different foaming ability. A series of fire tests was conducted to determine the time for extinguishing model flammable liquids by subsurface method, depending on the flow rate of foam of various expansion. It was revealed that with an increase in the proportion of alcohol in a flammable liquid to minimize the specific consumption, the optimum range of the foam expansion should shift to the area of large values. An empirical dependence was obtained, which determines the cumulative effect of the expansion and intensity of foam delivery on the specific consumption of the foaming agent working solution in case of subsurface extinction of model fuels with different alcohol concentrations. The effect of foam resistance to defoaming on the effectiveness of subsurface fire suppression is established.

Key words: sublayer fire extinguishing, foam expansion, model flammable liquid, oxygenates.

References

1. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P., Voevoda S. S., Sharovarnikov S. A. *Tusheniye pozharov nefi i nefteproduktov* [Fire extinguishing of oil and oil products]. Moscow, Kalan Publ., 2002. 448 p.
2. Bezrodnyi I. F. Forgotten names – the forgotten knowledge or... "Why do not extinguish the foam?..". *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 12, pp. 49-55 (in Russian).
3. Kotov A. A., Petrov I. I., Reutt V. Ch. *Primeneniye vysokokratnoy peny pri tushenii pozharov* [The use of high multiplicity foam to extinguish fires]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 113 p.
4. Hil' E. I., Makarova I. P., Sharovarnikov A. F. *Vlijanie kratnosti peny na jeffektivnost' tushenija plameni nefteproduktov podachej peny v osnovanie rezervuara* [Influence of foam multiplicity on the efficiency of extinguishing a flame of oil products by supplying foam to the tank base]. *Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse / Quality Management in the Oil and Gas Complex*, 2016, no. 1, pp. 48-50.
5. Feshchenko A. N., Macarov S. A., Rahmanin O. K. Features choice model flammable liquid to research the process of fires extinguishing of hydrocarbon and alcohol fuels. *Tekhnologii tehnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 2 (72), 2017, pp. 135-139. Available at: <http://academygps.ru/ttb> (in Russian).
6. Tikhomirov V. K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foam. Theory and practice of their production and destruction]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 264 p.
7. Feshchenko A. N., Makarov S. A., Tret'yakov A. V., Molchanov V. P., Voevoda S. S. Determination of frequency rate of film forming foam for sublayer suppression of the fires of combustible liquids. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 9, pp. 65-73. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.65-73 (in Russian).
8. Feshchenko A. N., Rakhmanin O. K. *Opredelenie prigodnosti penoobrazovatelej dlya pod-slojnogo pozharotusheniya spirtosoderzhashhikh nefteproduktov* [Determining the suitability of foaming agent for subsurface fire suppression of alcohol-containing petroleum products]. *Materialy VII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov "Problemy tehnosfernoj bezopasnosti – 2018"* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical conference of young scientists and specialists "Problems of technosphere safety – 2018"], Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia, 2018, pp. 37-40.

For citation: Feshchenko A. N. Regularities of extinguishing alcohol-containing fuels by the subsurface method using foam of various expansion. *Tekhnologii tehnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 1 (83), 2019, pp. 42-49 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.42-49.