

Д. А. КОРОЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA kbs@mgsu.ru)

А. А. ВОЛКОВ, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, ректор Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: RECTOR@mgsu.ru)

УДК 614.84.664

ТУШЕНИЕ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ПЕНОЙ ИЗ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Приведены результаты, полученные в ходе систематических экспериментальных исследований процесса тушения пламени нефтепродуктов подачей пены на горящую поверхность и в основание резервуара. Показано, что единственным способом объективно оценить эффективность пенообразователей является проведение комплексных испытаний, в ходе которых формируются кривые поверхностного и межфазного натяжения водных растворов пенообразователей на границе с углеводородом. В экспериментах использованы фторированные пенообразователи известных марок — Ansulite AFFF, Shtamex AFFF, Light WaterFS 201, CAPSTONE 1183 и Шторм-Ф, а в качестве горючих жидкостей — углеводороды, имеющие разную температуру вспышки. Выявлена общая закономерность зависимости удельного расхода пенообразователей от интенсивности подачи пены, представленная в виде кривых с наличием минимума на них при интенсивности, равной оптимальной. Установлены конкретные характеристики огнетушащей эффективности пены при тушении пламени горючих жидкостей, выраженные комплексом показателей, таких как критическая и оптимальная интенсивность подачи, а также минимальный удельный расход пенообразователя. Показано, что при тушении пламени нефтепродуктов пеной из пленкообразующих пенообразователей значения оптимальной интенсивности и минимального удельного расхода при подслоной подаче пены на 25–30 % ниже, чем при ее подаче на горящую поверхность углеводорода. Сделан вывод, что огнетушащая эффективность испытанных пленкообразующих пенообразователей выше при подслоном способе тушения. Показано также, что разница в показателях огнетушащей эффективности пены при выборе того или иного способа подачи объясняется разрушающим действием сопутствующих факторов: если при подслоном способе тушения пламени нефтепродуктов пена подвергается только воздействию потока тепла от факела пламени, то при подаче сверху она разрушается еще и от соприкосновения с горячей поверхностью нефтепродукта. На основе полученных данных разработана модель процесса тушения нефти путем подачи пены в основание резервуара, учитывающая снижение температуры горячей поверхности в процессе смешивания гомотермического слоя при всплытии пены.

Ключевые слова: тушение нефтепродуктов; подслоное тушение; огнетушащая эффективность; фторированный пленкообразующий пенообразователь; коэффициент растекания; оптимальная интенсивность; минимальный удельный расход.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.45-55

Введение

Среди большого количества новых разработок средств тушения пожаров нефти в резервуарах основное внимание уделяется огнетушащей пене. В первых устройствах подачи пены в основание резервуара с нефтепродуктами предусматривалось использование традиционных углеводородных пенообразователей, которые легко смешиваются с нефтью и в силу этого утрачивают огнетушащую эффективность [1, 2]. Для предотвращения контакта пены с горючей жидкостью была предусмотрена система, в которой пена поднимается на горящую поверхность через элас-

тичный рукав [3]. Пену получали с помощью высоконапорного генератора, работающего по принципу эжекции воздуха струей водного раствора. Однако наибольшая эффективность тушения пожара нефти и нефтепродуктов обеспечивается только путем применения пленкообразующих фторсинтетических пенных концентратов, пены на основе которых не смешиваются с углеводородами [4, 5]. Такие пены способны самопроизвольно покрывать поверхность нефтепродуктов водными пленками, стабилизированными фторсодержащими поверхностно-активными веществами (ПАВ) [6].

Противопожарная защита резервуаров с плавающей крышей предусматривает одновременную подачу пены на горящую поверхность и в слой нефтепродукта [7–9]. Пену низкой кратности производят пенные генераторы эжекционного типа. Кратность пены, получаемой с помощью таких генераторов, составляет 4–8 [10]. Для подачи пены в слой горючего и в основание резервуара рекомендуются пленкообразующие пенообразователи ([11], ГОСТ Р 53280.2–2010). Пена, полученная из таких пенообразователей, способна подниматься через слой горючего, не смешиваясь с нефтепродуктом и не утрачивая огнетушащей способности при тушении пламени [12]. На основании приведенных выше нормативных документов принимается, что пена, способная без потерь подниматься через толщу нефтепродукта, должна обладать большей эффективностью тушения пламени при ее подаче непосредственно на горящую поверхность. Однако экспериментальные исследования показали, что чаще всего наблюдается обратная картина, а именно: при подаче пены на горящую поверхность требуется большая интенсивность, а процесс тушения сопровождается повышенным удельным расходом пенообразующего раствора, полученного из пленкообразующих пенообразователей [13–15].

Целью данного исследования является установление конкретных характеристик огнетушащей эффективности пены при тушении пламени горючих жидкостей, выраженных комплексом показателей, таких как критическая и оптимальная интенсивность, а также минимальный удельный расход пенообразователя.

Для этого необходимо решить следующие задачи: определить минимальный удельный расход и оптимальную огнетушащую эффективность пленкообразующих пенообразователей при подаче пены на горящую поверхность и в слой углеводорода и разработать модель процесса тушения путем подачи пены в основание резервуара.

Методы исследования

Для экспериментов были использованы пленкообразующие пенообразователи: Ansulite AFFF, Shtamex AFFF, Light WaterFS 201, CAPSTONE 1183 и Шторм-Ф. Состав пенообразователей отличался как по составу, так и по химической природе фторированного ПАВ (ФПАВ). Единственным способом, по нашему мнению, объективно оценить качество ФПАВ является получение кривых поверхностного и межфазного натяжения водных растворов пенообразователей на границе с углеводородом экспериментальным путем [16, 17].

Перед огневыми испытаниями была измерена зависимость поверхностного и межфазного натяже-

ний от концентрации пенообразователей в водном растворе. Измерение поверхностного натяжения рабочего раствора пенообразователя и межфазного натяжения на границе рабочего раствора с н-гептаном проводилось с использованием метода Де-Нуи.

Время тушения при подаче пены в слой горючей жидкости определяли на лабораторной установке (рис. 1). Сначала приготавливали рабочий раствор пенообразователя. Затем в горелку заливали горючее, после чего жидкость в горелке зажигали. Время свободного горения горючей жидкости составляло (60 ± 5) с. Полученный раствор пенообразователя заливали в стакан электромеханического прибора (миксера), где в течение 30 с происходило образование пены. Полученную пену заливали в разъемный герметичный контейнер и взвешивали на весах, предварительно сняв крышку контейнера. Полученное значение массы заносили в журнал.

Под действием сжатого воздуха пена поступала через трубопровод в нижнюю часть горелки, непосредственно в горючую жидкость. Началом отсчета времени тушения служил момент, когда первая порция пены появлялась на поверхности горючего, а окончанием — полная ликвидация пламени, включая исчезновение его язычков вдоль борта. За результат измерения принималось среднее арифметическое трех значений времени тушения.

Для определения времени тушения и расхода пены применяли метод тушения н-гептана в противне с использованием пены низкой кратности. Испытание проводили на открытом воздухе при температуре 10–22 °С и скорости ветра вблизи противня не более 1,5 м/с. Перед каждым измерением осуществля-



Рис. 1. Экспериментальная установка для определения времени тушения гептана путем подачи пены в слой горючего
Fig. 1. The experimental installation for determining the time of heptane extinguishing by delivery of the foam into the combustible layer



Рис. 2. Процесс тушения пеной низкой (а) и высокой (б) кратности

Fig. 2. The process of fire extinguishing using low (a) and high (b) expansion factor foam

ли контроль температуры н-гептана и рабочего раствора пенообразователя, которая должна составлять $(17,5 \pm 2,5)^\circ\text{C}$. Для экспериментов было приготовлено по 100 дм³ рабочего раствора каждого испытуемого пенообразователя. Пену подавали в центр противня. За время тушения принималось время с момента начала подачи пены до момента прекращения горения (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных измерений поверхностной активности и расчета коэффициента растекания. Коэффициенты растекания водного раствора по гептану и гептана по раствору рассчитывались по соотношениям, приведенным в [1].

Величина поверхностного натяжения раствора пленкообразующего пенообразователя на границе с воздухом составляет 16–19 мН/м, величина межфазного поверхностного натяжения — 1,0–6,0 мН/м. Чтобы обеспечить растекание капли по углеводородам, которые имеют поверхностное натяжение 22,3 мН/м, поверхностное натяжение водного раствора должно быть 17 мН/м, а межфазное натяжение — 2,5 мН/м.

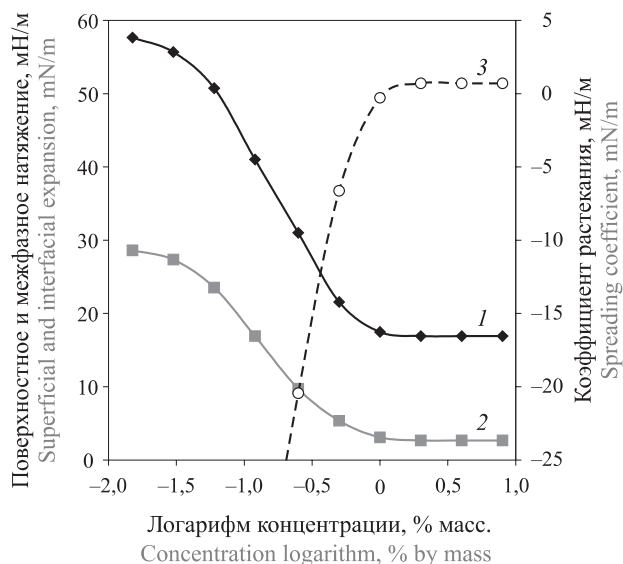


Рис. 3. Изотермы поверхностного (1) и межфазного (2) натяжений и коэффициент растекания (3) пенообразователя “Шторм-Ф” на границе с гептаном

Fig. 3. Isotherm of superficial (1) and interfacial (2) tension and spreading coefficient (3) of Shtorm-F foam generator on the interface with heptane

Пенообразователь “Шторм-Ф” использовался в виде рабочего раствора с концентрацией 6,0 % масс., при которой коэффициент растекания составил 0,9 мН/м, а остальные исследуемые пенообразователи — с такой концентрацией, при которой величина коэффициента растекания была больше нуля.

Для выяснения механизма контактного разрушения пены были проведены исследования зависимости поверхностного и межфазного натяжений от температуры. Как видно из рис. 4, значения поверхностного и межфазного натяжений снижаются по мере роста температуры раствора и гептана, уменьшается также межфазное натяжение на границе водного раствора с нагретым гептаном.

Результаты экспериментальных исследований процесса тушения пламени гептана пеной низкой кратности представлены на рис. 5–7.

Из рис. 4 видно, что скорость снижения поверхностного и межфазного натяжений в зависимости от температуры различна, поэтому коэффициент растекания, рассчитанный на их основе, меняет знак с положительного на отрицательный в условиях повышения температуры более 30°C . Полученные результаты показали, что водные растворы пенообразователя, относящегося к типично пленкообразующим, неспособны формировать водные пленки на поверхности гептана, разогретого до температуры более 35°C . Сравнение коэффициентов растекания раствора по горючему и горючего по водному раствору пенных пленок показывает, что растворы обладают преимущественным смачиванием углеводорода даже при температуре порядка 60°C . При по-

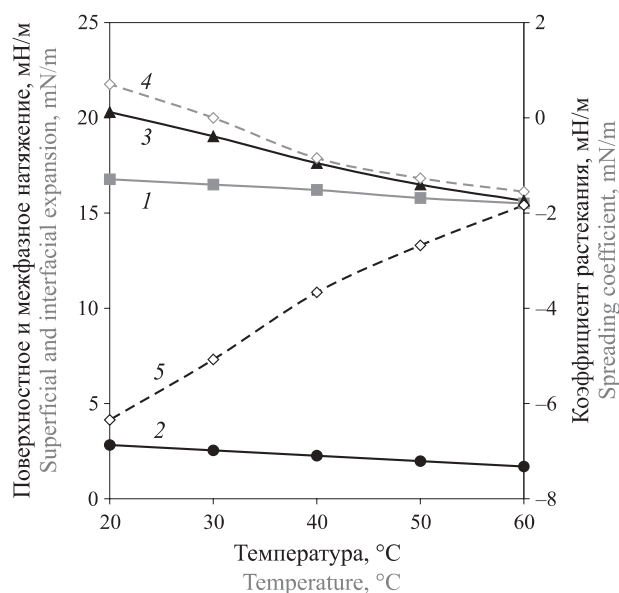


Рис. 4. Влияние температуры на поверхностное (1) и межфазное (2) натяжения пенообразователя “Light WaterFS 201” на границе с гептаном, поверхностное натяжение гептана (3) и на коэффициент растекания раствора по гептану (4) и гептана по раствору (5)

Fig. 4. The influence of temperature on the superficial (1) and interfacial (2) tensions of Light WaterFS 201 foam generator at the interface with heptane, superficial heptane tension (3), coefficient of spreading of solution over heptane (4) and of heptane over solution (5)

даче пены на горящую поверхность гептана разность поверхностных натяжений становится заметной, а поверхностное натяжение гептана будет меньше, чем холодного водного раствора пенообразователя. При этом коэффициент растекания водного раствора по гептану становится отрицательным, и пленка

на нагретой поверхности углеводорода не формируется.

В результатах испытаний всех представленных пленкообразующих пенообразователей прослеживается экстремальная зависимость удельного расхода пенообразующего раствора от интенсивности подачи пены. Положение минимума на кривых удельного расхода соответствует оптимальной интенсивности подачи пены. Оптимальная интенсивность подачи пены на горящую поверхность выше, чем при подаче пены в слой горящих жидкостей. Различие в показателях огнетушащей эффективности пены при различном способе подачи (на поверхность или под слой углеводорода) объясняется различием сопутствующих факторов, которые разрушительно действуют на пену. При любом из способов подачи на тушение происходит разрушение пены под воздействием потока тепла от факела пламени, а при подаче сверху — еще и от соприкосновения с горячей поверхностью нефтепродукта. При подслоной подаче пены нижние холодные слои нефтепродукта поднимаются к поверхности, в результате чего пена растекается по поверхностному слою, температура которого ниже установившейся при свободном горении жидкости. Поток тепла от факела пламени к горячей поверхности сокращается, что приводит к снижению скорости термического разрушения пены, поступающей из-под слоя нефтепродукта.

При подслоной подаче в резервуар пена длительное время контактирует с холодным нефтепродуктом, поднимаясь сквозь него к горячей поверхности. Если коэффициент растекания раствора по горючему близок к нулю, появляется вероятность

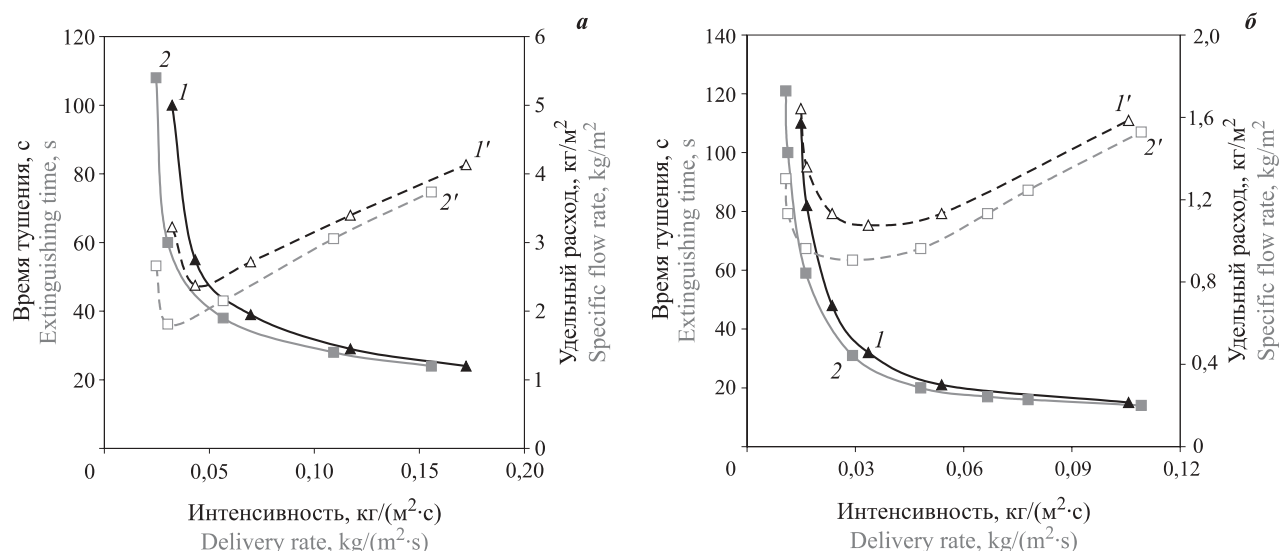


Рис. 5. Зависимость времени тушения пламени гептана (1, 2) и удельного расхода (1', 2') пенообразователя “CAPSTONE 1183” (a) и “Light WaterFS 201” (б) при подаче пены на горящую поверхность (1, 1') и в слой углеводорода (2, 2')

Fig. 5. Functional relationship of the duration of heptane flame extinguishing (1, 2) and specific flow rate (1', 2') of the foam generator CAPSTONE 1183 (a) and Light WaterFS 201 (b) at delivery of foam onto the surface (1, 1') and into the layer of hydrocarbon (2, 2')

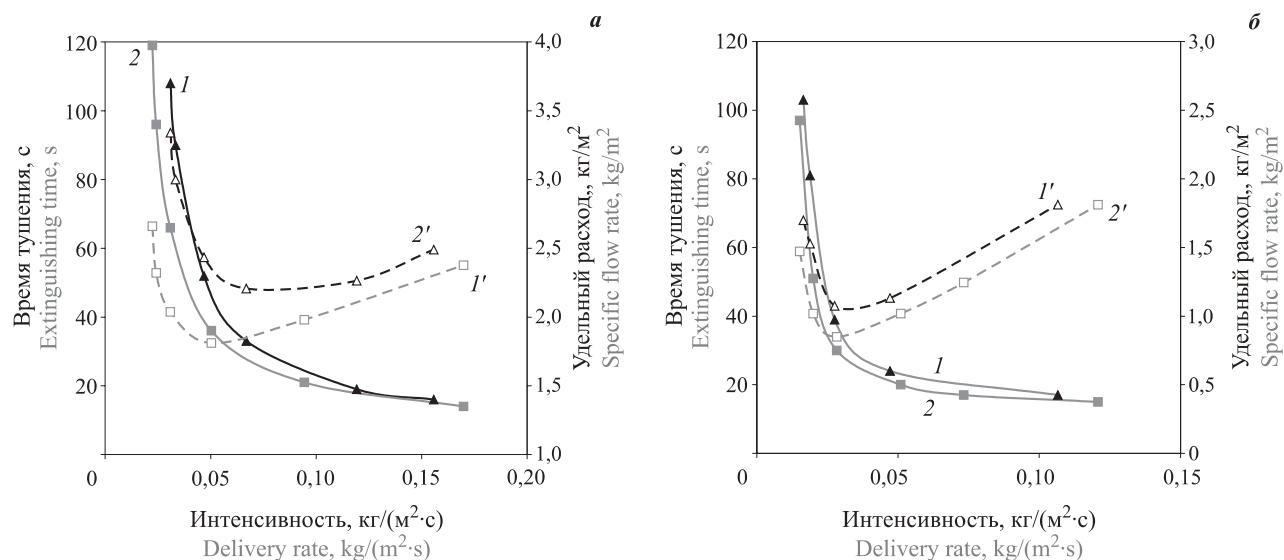


Рис. 6. Зависимость времени тушения пламени гептана (1, 2) и удельного расхода (1', 2') пенообразователя “Ansilite AFFF” (а) и “Shtamex AFFF” (б) при подаче пены на горящую поверхность (1, 1') и в слой углеводорода (2, 2')

Fig. 6. Functional relationship of the duration of heptane flame extinguishing (1, 2) and specific flow rate (1', 2') of the foam generator Ansilite AFFF (a) and Shtamex AFFF (b) at delivery of foam onto the burning surface (1, 1') and into the layer of hydrocarbon (2, 2')

загрязнения пены нефтепродуктом. В результате загрязненная пена частично утрачивает изолирующие свойства и разрушается с большей скоростью в процессе растекания по горячей поверхности.

Таким образом, при подаче пены на горящую поверхность существенным фактором является действие теплового потока и контактное разрушение от нагретого нефтепродукта, тогда как при подсло-

ной подаче наблюдается ослабленное воздействие факела пламени и загрязняющее действие контакта с углеводородом в процессе подъема пены на горящую поверхность.

Анализ процесса тушения пламени нефтепродуктов пеной приведен в работах [2, 7, 9, 15]. Новшеством в анализе процесса тушения, представленном в настоящей статье, стала попытка учесть снижение испарения гептана в результате охлаждения поверхностного слоя нефтепродукта посредством поднимающихся потоков пены, поданной в основание резервуара. В соответствии с [18–21] поток пузырей воздуха, поданный с пеной в основание резервуара, увлекает вверх холодные слои горючей жидкости. При тушении пламени гептана и бензина охлаждение поверхностного слоя даже до комнатной температуры не приводит к потуханию пламени, поскольку бензин имеет температуру вспышки минус 10 °С. В данном случае происходит снижение давления равновесного пара и скорости поступления горючего пара в зону горения, вследствие чего возникает два дополнительных эффекта — снижение температуры поверхностного слоя и сокращение теплового потока от факела пламени. Оба фактора сказываются на снижении удельной скорости термического разрушения пены.

В общем случае скорость испарения жидкости определяется суммой молекулярного и диффузионного потоков пара. С помощью формулы Стефана можно проанализировать влияние основных параметров, изменяющихся в процессе тушения, на скорость испарения горючих жидкостей (ГЖ): температуры поверхности, температуры газовой фазы, толщины диф-

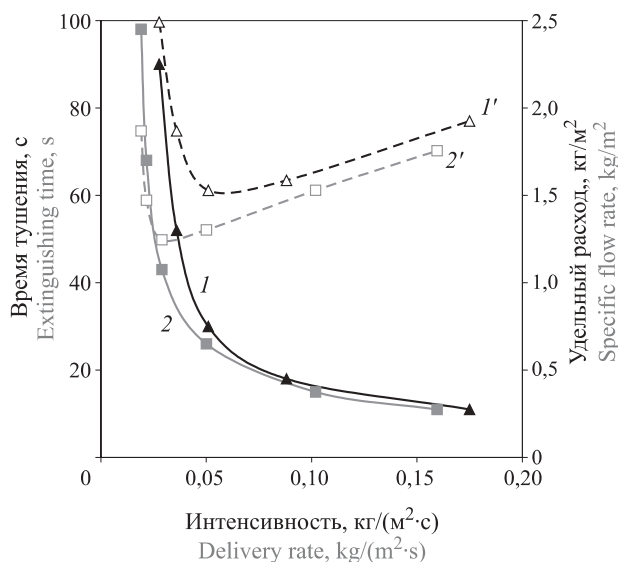


Рис. 7. Зависимость времени тушения пламени гептана (1, 2) и удельного расхода (1', 2') пенообразователя “Шторм Ф” при подаче пены на горящую поверхность (1, 1') и в слой углеводорода (2, 2')

Fig. 7. Functional relationship of the duration of heptane flame extinguishing (1, 2) and specific flow rate (1', 2') of the foam generator Shtorm F at delivery of foam onto the burning surface (1, 1') and into the layer of hydrocarbon (2, 2')

фузионного слоя, структуры молекул горючего, концентрации паров жидкости в окружающей среде:

$$u_m^0 = \frac{D_0}{RT_0} \left(\frac{T_F}{T_0} \right)^n \frac{P_a}{\delta} \ln \frac{P_a - P_1}{P_a - P_s}, \quad (1)$$

где u_m^0 — удельная скорость испарения, кг/(м²·с);
 D_0 — коэффициент диффузии молекул ГЖ в газовой фазе при нормальной температуре T_0 , м²/с;
 R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К);
 T_F — температура газовой фазы, К;
 n — показатель степени, равный для углеводородов приблизительно двум;
 P_a — атмосферное давление, Па;
 δ — толщина диффузионного слоя, м;
 P_1 — давление пара ГЖ в окружающей среде на расстоянии δ от поверхности, Па;
 P_s — давление насыщенного пара ГЖ при температуре поверхности T_s , Па.

В соответствии с формулой Стефана скорость выгорания (испарения при горении) будет настолько высока, насколько велико давление пара жидкости P_s и температура в газовой фазе. При горении величина P_1 , как правило, очень мала, поскольку измеряется в зоне горения, а толщина диффузионного слоя измеряется от поверхности ГЖ до зоны горения. При ламинарном горении ГЖ в цилиндрических горелках величина P_1 равна высоте свободного борта, а при турбулентном горении — фактическому расстоянию до факела пламени. Снижение давления насыщенного пара, происходящее из-за подъема охлажденной жидкости, рассчитывается по уравнению Клаузиуса-Клапейрона:

$$\ln \frac{P_s}{P_0} = -\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right), \quad (2)$$

где P_0 — давление насыщенного пара при нормальной температуре, Па;
 ΔH — теплота испарения ГЖ, Дж/кг;
 T_s — температура поверхности при давлении P_s , К.

Снижение температуры поверхностного слоя происходит пропорционально величине потока жидкости, увлекаемого пеной. Расход потока жидкости q_g (кг/с) пропорционален интенсивности подачи воздушной струи [22, 23]. В данном случае поток пены низкой кратности q_F (кг/(м²·с)) определяется из формулы

$$q_g = \beta q_F^{1/3}, \quad (3)$$

где β — коэффициент пропорциональности.

Количество тепла q_o (Дж), поступающее от факела пламени к поверхности горючей жидкости площадью S_o (м²) в стационарном режиме горения, можно выразить через удельную массовую скорость ее

выгорания U'_m (кг/(м²·с)) и удельную теплоту, необходимую для нагревания жидкости до температуры кипения, Q_Γ (Дж/кг) [3]:

$$U'_m = q_o / (Q_\Gamma S_o). \quad (4)$$

Таким образом,

$$q_o = U'_m Q_\Gamma S_o. \quad (5)$$

Учитывая, что примерно такое же количество тепла отводится на прогрев жидкости в глубину, в формулу (5) введем коэффициент 2 и получим:

$$q_o = 2U'_m Q_\Gamma S_o. \quad (6)$$

Принимая, что причиной разрушения пены является нагревание верхнего слоя пенных пузырьков тепловым потоком от факела пламени до температуры кипения, получим формулу для оценки удельной скорости термического разрушения пены U_o (кг/(м²·с)) без учета понижения температуры поверхностного слоя:

$$U_o = 6U'_m Q_\Gamma / Q_B, \quad (7)$$

где Q_B — удельная теплота, необходимая для нагрева воды до температуры кипения, Дж/кг.

При подаче пены в основание резервуара скорость выгорания снижается по мере уменьшения температуры поверхностного слоя в соответствии с формулами (1) и (2). Температура поверхностного слоя при интенсивности подачи пены, равной критической или превышающей ее, равна половине суммы температуры кипения и температуры окружающей среды: $T = (T_k + T_0)/2$. Принимая, что скорость выгорания пропорциональна температуре, и используя формулы (1), (2) и (7), получим выражение для расчета удельной скорости термического разрушения пены при частичном охлаждении горячей поверхности, вызванном подъемом холодной жидкости:

$$U_o = \frac{6U'_m Q_\Gamma}{Q_B} \frac{T_k + T_0}{2}. \quad (8)$$

При анализе материального баланса, полученного в процессе тушения пламени путем подачи пены в основание резервуара, необходимо использовать формулу для расчета удельной скорости термического разрушения пены (8), а при подаче пены на горящую поверхность — формулу (7).

Материальный баланс пены при тушении пламени гептана может быть представлен в виде:

$$\underbrace{q d\tau_T}_{\text{поданная пена}} = \underbrace{\theta S_o (U_T + U_k) d\tau_T}_{\text{потери термические и контактные}} + \underbrace{\rho \bar{h} S_o d\theta}_{\text{накопление}} \quad (9)$$

где q — расход пены, кг/с;

τ_T — время тушения, с;

U_T — средняя удельная скорость термического разрушения, кг/(м²·с);

U_k — средняя удельная скорость контактного разрушения пены, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

ρ — средняя плотность пены, $\text{кг}/\text{м}^3$;

h — средняя толщина слоя пены, м;

θ — степень покрытия горячей поверхности пеной.

Из материального баланса можем определить время тушения пламени огнетушащим веществом:

$$\tau_T = -\frac{\rho \bar{h}}{U_T \pm U_k} \ln \left[1 - \frac{S_o (U_T + U_k)}{q} \right]. \quad (10)$$

Обозначим $q/S_o = J$. Разделив числитель и знаменатель выражения под логарифмом на S_o , проведем анализ формулы (10). При равенстве числителя и знаменателя в выражении под логарифмом возникает критическая ситуация, поскольку логарифм нуля равен бесконечности, т. е. время тушения становится бесконечно большим. Такая ситуация, когда $q/S_o \equiv S_o (U_T + U_k)$, называется критической, а выражение $q/S_o = S_o (U_T + U_k) \equiv J_{кр}$ называется критической интенсивностью подачи пены. Формулу (10) представим в виде, удобном для дальнейшего анализа результатов экспериментов:

$$\tau_T = -\frac{\rho h_0}{J_{кр}} \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right] \ln \left(1 - \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (11)$$

Средняя толщина слоя пены определяется полусуммой минимальной толщины h_0 и толщиной слоя в месте появления (падения) пены h_q , причем $h_q = \beta J^n$. Показатель степени не определен, но, судя по экспериментам, находится в диапазоне от 0,5 до 1,0.

Для удельного расхода $Q = J \tau_T$ получим:

$$Q = -\frac{\rho h_0 J}{J_{кр}} \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right] \ln \left(1 - \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (12)$$

Сопоставление результатов эксперимента с расчетом по формуле (12) показало их удовлетворительное совпадение, что указывает на правильность принятой модели тушения пламени ЛВЖ и ГЖ пеной из пленкообразующих пенообразователей. Выборочная демонстрация сопоставления результатов расчета с экспериментом представлена на рис. 8.

Судя по углу наклона восходящей ветви кривой удельного расхода на рис. 8, показатель степени n в формуле (12) оказался равным 1. При расчетах, сделанных для подслоного способа тушения, использовали формулу термического разрушения пены частично охлажденной, перемешанной, горячей жидкостью.

Закключение

1. В результате систематических экспериментальных исследований процесса тушения пламени нефте-

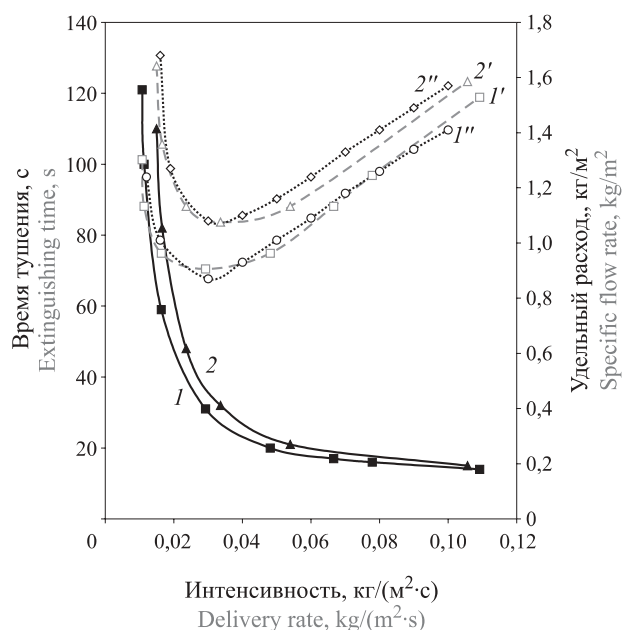


Рис. 8. Зависимость времени тушения гептана (1, 2) и удельного расхода (1', 2') пенообразователя "Light WaterFS 201" (1', 2', 1'', 2'') при подаче пены под слой (1, 1', 1'') и на поверхность гептана (2, 2', 2''): 1, 1', 2, 2' — эксперимент; 1'', 2'' — расчет по формуле (11)

Fig. 8. Functional relationship of the duration of heptane flame extinguishing (1, 2) and specific flow rate (1', 2') of the foam generator Light WaterFS 201 (1', 2', 1'', 2'') at delivery of foam onto the burning surface (1, 1', 1'') and into the layer of hydrocarbon (2, 2', 2''): 1, 1', 2, 2' — experiment; 1'', 2'' — calculation results based on formula (11)

продуктов путем подачи пены на горящую поверхность и в основание резервуара обнаружено наличие общей закономерности зависимости удельного расхода пенообразователей от интенсивности подачи пены. Эта зависимость отображается в виде кривых удельного расхода с наличием минимума на них при интенсивности, равной оптимальной.

2. В результате экспериментов установлены конкретные характеристики огнетушащей эффективности пены при тушении пламени горючих жидкостей, выраженные комплексом показателей, таких как критическая и оптимальная интенсивность, а также минимальный удельный расход пенообразователя.

3. При тушении пламени нефтепродуктов пеной, полученной из пленкообразующих пенообразователей, определили, что оптимальная интенсивность и минимальный удельный расход при подслоной подаче пены на 25–30 % ниже, чем при подаче ее на горящую поверхность углеводорода. Следовательно, огнетушащая эффективность испытанных пленкообразующих пенообразователей выше при подслоном способе тушения пламени углеводородов.

4. Разработанная модель процесса тушения путем подачи пены в основание резервуара учитывает снижение температуры горячей поверхности при пода-

че пены в слой нефтепродукта. Расчеты по выведенным соотношениям показали удовлетворительное

совпадение модельных представлений с результатами экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М. : Изд. дом “Калан”, 2002. — 448 с.
2. Korzeniowski S., Cortina T. Firefighting foams — Reebok redux // *Industrial Fire Journal*. — April 2008. — P. 18–20.
3. Lang Xu-qing, Liu Quan-zhen, Gong Hong. Study of fire fighting system to extinguish full surface fire of large scale floating roof tanks // *Procedia Engineering*. — 2011. — Vol. 11. — P. 189–195. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.646.
4. Cortina T. The safety & benefits of AFFF agents. Special analysis: Foam // *Industrial Fire Journal*. — June 2007. — P. 70–75.
5. Pabon M., Corpart J. M. Fluorinated surfactants: synthesis, properties, effluent treatment // *Journal of Fluorine Chemistry*. — 2002. — Vol. 114, No. 2. — P. 149–156. DOI: 10.1016/S0022-1139(02)00038-6.
6. Маркеев В. А., Воевода С. С., Корольченко Д. А. Противопожарная защита объектов резервуарного парка ОАО “НК “Роснефть” // *Нефтяное хозяйство*. — 2006. — № 9. — С. 83–85.
7. Korolchenko D. A., Degaev E. N., Sharovarnikov A. F. Determination of the effectiveness of extinguishing foaming agents in the laboratory // 2nd International Conference on Material Engineering and Application (ICMEA 2015). — 2015. — P. 17–22.
8. Nash P., Whittle J. Fighting fires in oil storage tanks using base injection of foam — Part I // *Fire Technology*. — 1978. — Vol. 14, Issue 1. — P. 15–27. DOI: 10.1007/bf01997258.
9. Shaluf I. M., Abdullah S. A. Floating roof storage tank boilover // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2011. — Vol. 24, Issue 1. — P. 1–7. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.06.007.
10. Huang Yinsheng, Wencheng Zhang, Dai Xiaojing, Zhao Yu. Study on water-based fire extinguishing agent formulations and properties // *Procedia Engineering*. — 2012. — Vol. 45. — P. 649–654. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.217.
11. NFPA 11. Standard for low, medium, and high-expansion foam. Edition 2002. URL: <http://pozhpriekt.ru/nsis/nfpa/NFPA11-2002.pdf> (дата обращения: 07.06.2017)
12. Bergeron V., Walstra P. Chapter 7. Foams // *Fundamentals of Interface and Colloid Science*. — 2005. — Vol. 5. — P. 7.1–7.38. DOI: 10.1016/S1874-5679(05)80011-X.
13. Korolchenko D., Tusnin A., Trushina S., Korolchenko A. Physical parameters of high expansion foam used for fire suppression in high-rise buildings // *International Journal of Applied Engineering Research*. — 2015. — Vol. 10, No. 21. — P. 42541–42548.
14. Schaefer T. H., Dlugogorski B. Z., Kennedy E. M. Sealability properties of fluorine-free fire-fighting foams (FfreeF) // *Fire Technology*. — 2007. — Vol. 44, No. 3. — P. 297–309. DOI: 10.1007/s10694-007-0030-8.
15. Lattimer B. Y., Trelles J. Foam spread over a liquid pool // *Fire Safety Journal*. — 2007. — Vol. 42, Issue 4. — P. 249–264. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.10.004.
16. Korolchenko D., Voevoda S. Influence of dispersion degree of water drops on efficiency of extinguishing of flammable liquids // *MATEC Web of Conferences*. — 2016. — Vol. 86, Art. No. 04056. DOI: 10.1051/matecconf/20168604056.
17. Kennedy M. J., Conroy M. W., Dougherty J. A., Otto N., Williams B. A., Ananth R., Fleming J. W. Bubble coarsening dynamics in fluorinated and non-fluorinated firefighting foams // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. — 2015. — Vol. 470. — P. 268–279. DOI: 10.1016/j.col-surfa.2015.01.062.
18. Korolchenko D., Voevoda S. Influence of spreading structure in an aqueous solution-hydrocarbon system on extinguishing of the flame of oil products // *MATEC Web of Conferences*. — 2016. — Vol. 86, Art. No. 04038. DOI: 10.1051/matecconf/20168604038.
19. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. — М. : ВИПТШ МВД СССР, 1980. — 255 с.
20. Zhang Qinglin, Wang Lu, Bi Yixing, Xu Dajun, Zhi Huiqiang, Qiu Peifang. Experimental investigation of foam spread and extinguishment of the large-scale methanol pool fire // *Journal of Hazardous Materials*. — 2015. — Vol. 287. — P. 87–92. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.017.
21. Nurimoto N. Fire extinguishing installations for oil storages injecting foam under the layer of oil product // *Kasay*. — 1977. — Vol. 27, No. 3. — P. 11–19.

22. *Ranjbar H., Shahraki B. H.* Effect of aqueous film-forming foams on the evaporation rate of hydrocarbon fuels // *Chemical Engineering and Technology*. — 2013. — Vol. 36, Issue 2. — P. 295–299. DOI: 10.1002/ceat.201200401.
23. *Kovalchuk N. M., Trybala A., Starov V., Matar O., Ivanova N.* Fluoro- vs hydrocarbon surfactants: Why do they differ in wetting performance? // *Advances in Colloid and Interface Science*. — 2014. — Vol. 210. — P. 65–71. DOI: 10.1016/j.cis.2014.04.003.

Материал поступил в редакцию 12 июня 2017 г.

Для цитирования: *Корольченко Д. А., Волков А. А.* Тушение горючих жидкостей пеной из пленкообразующих пенообразователей // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2017. — Т. 26, № 8. — С. 45–55. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.45-55.

English

EXTINGUISHING OF FLAMMABLE LIQUIDS BY FILM FORMING FOAMING AGENTS

KOROLCHENKO D. A., Candidate of Technical Sciences,
Head of Department of Complex Safety in Construction,
National Research Moscow State University of Civil
Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337,
Russian Federation; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

VOLKOV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of Russian Academy of Architecture
and Construction Science, Rector of National Research Moscow
State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26,
Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail: RECTOR@mgsu.ru)

ABSTRACT

This paper describes the results obtained during systematic experimental research of the oil product flame extinguishing process by injecting foam onto the burning surface and to the tank base. As a rule, the same foam generator, compound, chemical formula and proprietary component ratio are used for fire extinguishing using subsurface foam injection and by feeding foam onto the burning surface. The only way to estimate the foam generator efficiency objectively is carrying out comprehensive testing during which curves are plotted for superficial and interfacial tension at the interface of water foam generator solutions with a hydrocarbon. Fluorated foam generators of known brands were used in the experiments: Ansulite AFFF, Shtamex AFFF, Light WaterFS 201, CAPSTONE 1183 and Shtorm-F. Hydrocarbon with different flash temperature was used as combustible liquids. As a result of the conducted experiments, a general regularity was discovered. It is the functional relation between the specific flow rate of foam generators and foam delivery rate shown using curves, the specific flow rate being minimum at the optimum delivery rate. The specific foam extinguishing efficiency characteristics have been determined during combustible liquid flame extinguishing. They are expressed as a complex of indices: critical and optimum delivery rate, and the minimum specific flow rate of the foam generator. The experiment results have shown that during oil product flame extinguishing using film-forming foam generator foam the value of the optimum delivery rate and minimum specific flow rate in case of subsurface foam injection was lower than during feeding of the foam onto the burning hydrocarbon surface by 25 to 30 %. Consequently, the extinguishing efficiency of the tested film-forming foam generators appeared to higher in case of the subsurface extinguishing method. The difference of indices of foam extinguishing efficiency in case of a particular feeding method is due to destructive effect of some contributing factors. While foam is only exposed to flame jet heat flow during the subsurface oil product flame extinguishing, in case of feeding from above foam is also destroyed as a result of the contact with burning oil product surface. Based on the obtained data, a model of the process of oil extinguishing by feeding foam to the tank base was developed. This model takes into consideration decrease of the burning surface temperature during mixing of homothermal layer when the foam emerges.

Keywords: oil extinguishing; subsurface extinguishing; fire extinguishing efficiency; fluorinated film-forming foam generator; spreading coefficient; optimum delivery rate; minimum specific flow rate.

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. (in Russian).
2. Korzeniowski S., Cortina T. Firefighting foams — Reebok redux. *Industrial Fire Journal*, April 2008, pp. 18–20.
3. Lang Xu-qing, Liu Quan-zhen, Gong Hong. Study of fire fighting system to extinguish full surface fire of large scale floating roof tanks. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 11, pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.646.
4. Cortina T. The safety & benefits of AFFF agents. Special analysis: Foam. *Industrial Fire Journal*, June 2007, pp. 70–75.
5. Pabon M., Corpart J. M. Fluorinated surfactants: synthesis, properties, effluent treatment. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2002, vol. 114, no. 2, pp. 149–156. DOI: 10.1016/S0022-1139(02)00038-6.
6. Markeev V. A., Voevoda S. S., Korolchenko D. A. Fire protection of tank farm objects of Rosneft NK OAO. *Neftyanoye khozyaystvo / Oil Industry*, 2006, issue 9, pp. 83–85 (in Russian).
7. Korolchenko D. A., Degaev E. N., Sharovarnikov A. F. Determination of the effectiveness of extinguishing foaming agents in the laboratory. In: *2nd International Conference on Material Engineering and Application (ICMEA 2015)*, 2015, pp. 17–22.
8. Nash P., Whittle J. Fighting fires in oil storage tanks using base injection of foam — Part I. *Fire Technology*, 1978, vol. 14, issue 1, pp. 15–27. DOI: 10.1007/bf01997258.
9. Shaluf I. M., Abdullah S. A. Floating roof storage tank boilover. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, vol. 24, issue 1, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.06.007.
10. Huang Yinsheng, Wencheng Zhang, Dai Xiaojing, Zhao Yu. Study on water-based fire extinguishing agent formulations and properties. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 45, pp. 649–654. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.217.
11. NFPA 11. *Standard for low, medium, and high-expansion foam*. Edition 2002. Available at: <http://pozhpoeekt.ru/nsis/nfpa/NFPA11-2002.pdf> (Accessed 7 June 2017).
12. Bergeron V., Walstra P. Chapter 7. Foams. In: *Fundamentals of Interface and Colloid Science*, 2005, vol. 5, pp. 7.1–7.38. DOI: 10.1016/S1874-5679(05)80011-X.
13. Korolchenko D., Tusnin A., Trushina S., Korolchenko A. Physical parameters of high expansion foam used for fire suppression in high-rise buildings. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 21, pp. 42541–42548.
14. Schaefer T. H., Dlugogorski B. Z., Kennedy E. M. Sealability properties of fluorine-free fire-fighting foams (FfreeF). *Fire Technology*, 2007, vol. 44, issue 3, pp. 297–309. DOI: 10.1007/s10694-007-0030-8.
15. Lattimer B. Y., Trelles J. Foam spread over a liquid pool. *Fire Safety Journal*, 2007, vol. 42, issue 4, pp. 249–264. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.10.004.
16. Korolchenko D., Voevoda S. Influence of dispersion degree of water drops on efficiency of extinguishing of flammable liquids. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 86, art. no. 04056. DOI: 10.1051/matecconf/20168604056.
17. Kennedy M. J., Conroy M. W., Dougherty J. A., Otto N., Williams B. A., Ananth R., Fleming J. W. Bubble coarsening dynamics in fluorinated and non-fluorinated firefighting foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, vol. 470, pp. 268–279. DOI: 10.1016/j.col-surfa.2015.01.062.
18. Korolchenko D., Voevoda S. Influence of spreading structure in an aqueous solution-hydrocarbon system on extinguishing of the flame of oil products. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 86, art. no. 04038. DOI: 10.1051/matecconf/20168604038.
19. Abduragimov I. M., Govorov V. Yu., Makarov V. E. *Fiziko-khimicheskiye osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physico-chemical basis of development and extinguishing of fires]. Moscow, High Engineering Fire Technical School of Ministry of the Interior of USSR Publ., 1980. 255 p. (in Russian).
20. Zhang Qinglin, Wang Lu, Bi Yixing, Xu Dajun, Zhi Huiqiang, Qiu Peifang. Experimental investigation of foam spread and extinguishment of the large-scale methanol pool fire. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, vol. 287, pp. 87–92. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.017.
21. Nurimoto N. Fire extinguishing installations for oil storages injecting foam under the layer of oil product. *Kasay*, 1977, vol. 27, no. 3, pp. 11–19.

22. Ranjbar H., Shahraki B. H. Effect of aqueous film-forming foams on the evaporation rate of hydrocarbon fuels. *Chemical Engineering and Technology*, 2013, vol. 36, issue 2, pp. 295–299. DOI: 10.1002/ceat.201200401.
23. Kovalchuk N. M., Trybala A., Starov V., Matar O., Ivanova N. Fluoro- vs hydrocarbon surfactants: Why do they differ in wetting performance? *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, vol. 210, pp. 65–71. DOI: 10.1016/j.cis.2014.04.003.

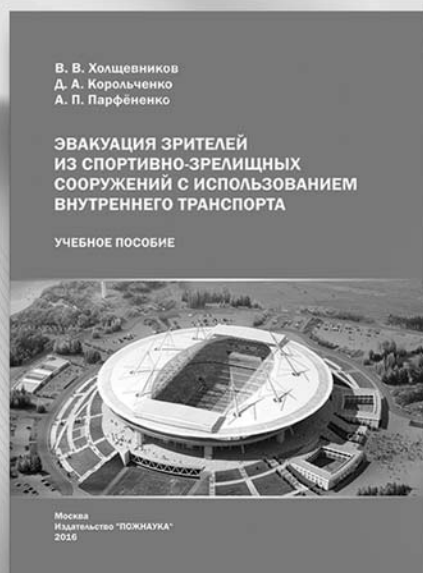
For citation: Korolchenko D. A., Volkov A. A. Extinguishing of flammable liquids by film forming foaming agents. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 8, pp. 45–55 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.45-55.



ООО «Издательство «ПОЖНАУКА»

предлагает Вашему вниманию

Учебное пособие



Холщевников В. В.
Корольченко Д. А.
Парфёненко А. П.

ЭВАКУАЦИЯ ЗРИТЕЛЕЙ ИЗ СПОРТИВНО-ЗРЕЛИЩНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТА

М. : Изд-во «ПОЖНАУКА», 2016. — 88 с.

Впервые в практике архитектурно-строительного преподавания рассмотрена методология учета важнейшего функционального процесса — движения людских потоков с использованием эскалаторов и лифтовых установок при различных режимах эксплуатации зданий, включая чрезвычайную ситуацию пожара, на примере реального объекта с большим количеством находящихся в нем людей.

Для заказа книги пишите нам по адресу:
121352, г. Москва, а/я 43,
или звоните по телефону
8 (495) 228-09-03.

Вы можете также оформить заказ через электронную почту:
mail@firepress.ru.