

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

АНАЛИЗ ТИПОВОГО СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА РАЗЛИЧНЫХ ОГNETУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИХ ПОДАЧИ

На основе анализа экспериментального материала по тушению пламени горючих жидкостей предложена модель процесса тушения, которая включает локальное взаимодействие основания распыленной струи с участком факела пламени и дальнейшее растекание тушащего слоя по горячей поверхности нефтепродукта. Рассмотрен материальный баланс процесса тушения пламени углеводорода методом покрытия горячей поверхности слоем огнетушащего вещества (ОТВ). На конкретной модели тушения пламени бензина распыленной водой высокой степени дисперсности приведено описание экспериментальных результатов зависимости времени тушения и удельного расхода ОТВ от интенсивности его подачи, на основе которых определены оптимальная интенсивность подачи и минимальный удельный расход распыленной воды. Проведен анализ тушения пламени бензина струей распыленного фреона 114B2 и огнетушащим порошком. Рассмотрен процесс тушения пламени гептана подачей пены на горящую поверхность и в слой нефтепродукта. Для описания результатов эксперимента предложена формула, в которой используются данные по процессу тушения пламени пенами, полученными из углеводородных и фторированных пенообразователей. Показана возможность создания типового уравнения для описания зависимости удельного расхода и времени тушения от интенсивности подачи вещества различной природы. Показана возможность определения оптимальной интенсивности и минимального удельного расхода огнетушащего вещества независимо от его природы, а также возможность применения типового расчетного соотношения для описания процесса тушения пламени как распыленными струями, так и пеной при подаче на горящую поверхность и в слой нефтепродукта.

Ключевые слова: модель процесса тушения; удельный расход; время тушения; интенсивность подачи; огнетушащие вещества; механизм тушения.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76

Комплексные исследования огнетушащего действия веществ различной природы (воды грубой и тонкой дисперсности, водных пленкообразующих растворов, химически активных хладонов, порошковых составов различной степени дисперсности, твердых аэрозолей и пен различной кратности) показали возможность применения типовой модели тушения пламени горючих жидкостей огнетушащими веществами (ОТВ). Данная модель базируется на принципе двойственного механизма тушащего действия огнетушащих веществ [1, 2].

Для описания экспериментальных результатов зависимости удельного расхода и времени тушения

от интенсивности подачи огнетушащего вещества в литературе предлагаются различные варианты уравнений [3–9].

Цель настоящей работы — показать возможность создания типового уравнения для описания зависимости удельного расхода и времени тушения от интенсивности подачи веществ различной природы. На основе анализа экспериментального материала по тушению пламени горючих жидкостей показана также возможность определения оптимальной интенсивности и минимального удельного расхода ОТВ независимо от его природы. Методы экспериментального исследования описаны в работах [10–12].

Основой для анализа является двойственный механизм тушащего действия ОТВ [1, 2]. Двойственный механизм отличается универсальностью и особенно сильно проявляется при тушении, например, пламени горючих жидкостей распыленными струями воды и хладона, струей порошка и воздуха, пеной при подаче в основание горящего резервуара с нефтепродуктом.

Двойственный механизм сопровождается увлечением кислорода воздуха струей вещества, поэтому в первый момент подачи струи факел пламени резко увеличивается в объеме. Учет действия притока дополнительного объема воздуха позволил выявить природу экстремальной зависимости удельного расхода от интенсивности подачи огнетушащего вещества и существование оптимальной интенсивности его подачи при тушении пламени.

Двойственный механизм тушения пламени огнетушащими веществами включает основное и сопутствующее действия ОТВ: основное — снижение температуры в зоне горения с поглощением тепла на фазовые превращения, снижение концентрации горючего компонента; сопутствующее — повышение температуры, расширение зоны горения, снижение эффективности действия огнетушащего вещества.

На основе систематических исследований процесса тушения пламени горючих жидкостей различными ОТВ предложен локальный механизм тушения пламени струей огнетушащего вещества [13]. В соответствии с этим механизмом тушение дисперсными ОТВ происходит через локальное взаимодействие основания струи с частью факела пламени. Таким образом, струя огнетушащего вещества, не подвергаясь воздействию высокой температуры всего факела пламени, поступает через потушенный участок в предпламенную зону, снизу факела пламени, и далее растекается по поверхности горящего нефтепродукта.

Тушение происходит за счет постепенного покрытия горячей поверхности слоем ОТВ, концентрация которого в смеси с воздухом выше или соответствует минимальной флегматизирующей концентрации. Флегматизированный слой, поднимаясь в зону горения, прекращает процесс горения.

Высокодисперсные жидкости, включая воду и жидкие фреоны, при подаче в зону горения после прохождения пламенной зоны превращаются в пар. Через потушенный участок факела пламени струя пара попадает непосредственно на поверхность жидкости. Тушение пламени происходит за счет распространения слоя флегматизированной паровоздушной смеси по горячей поверхности нефтепродукта. Для водяного пара минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора (МФКФ) составляет 30–35 % об., для фреонов — 3–10 % об.

Вывод расчетного выражения для описания зависимости времени тушения и удельного расхода ОТВ от интенсивности его подачи осуществляется на основании результатов ранее проведенных работ [3–9, 14–19].

Рассмотрим материальный баланс процесса тушения пламени углеводорода методом покрытия горячей поверхности слоем огнетушащего вещества средней толщиной h (м), со средней удельной скоростью потерь, пропорциональной площади поверхности растекающегося слоя:

$$q \, d\tau = U S d\tau + \rho h dS, \quad (1)$$

где q — расход ОТВ, кг/с или $\text{м}^3/\text{с}$;

τ — время тушения, с;

U — удельная скорость выгорания жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

S — площадь горения, м^2 ;

ρ — плотность тушащего слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Решая уравнение (1) при начальных условиях $\tau = 0$, $S = 0$ и замене отношения $q/S = J$, получаем формулу

$$\tau = -\frac{\rho h}{U} \ln \left(1 - \frac{U}{J} \right), \quad (2)$$

где J — текущее значение интенсивности подачи раствора, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Из формулы (2) следует, что при $J = U$ время тушения стремится к бесконечности, т. е. возникает критическая ситуация, при которой все поданное вещество полностью утрачивается. Обозначив $J = U \equiv J_{\text{кр}}$ (где $J_{\text{кр}}$ — критическая интенсивность подачи ОТВ, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), получим известное соотношение [7–11], которое связывает время тушения с критической интенсивностью подачи огнетушащего вещества:

$$\tau = -\frac{\rho h}{J_{\text{кр}}} \ln \left(1 - \frac{J_{\text{кр}}}{J} \right). \quad (3)$$

Если принять во внимание, что средняя толщина тушащего слоя неодинакова в месте падения и на фронте распространения слоя, то среднее значение определяется полусуммой толщин слоя в месте падения струи и на фронте слоя. Толщина слоя в месте падения струи на горящую поверхность зависит от интенсивности подачи распыленной струи. Предложенная зависимость средней толщины тушащего слоя h от интенсивности подачи струи может быть описана формулой

$$h = \frac{h_0 + \beta J^n}{2}, \quad (4)$$

где h_0 — толщина слоя в месте падения струи на горящую поверхность, м;

β — коэффициент пропорциональности;

n — показатель степени, характеризующий темп нарастания средней толщины тушащего слоя.

Функциональная зависимость средней толщины тушащего слоя от интенсивности подачи ОТВ, в первом приближении, может быть линейной, т. е. $n = 1$. Однако это неоднозначно, поэтому в формулу зависимости средней толщины от интенсивности вводится показатель степени, значение которого может изменяться от 0,5 до 2,5. После проведения экспериментальных исследований по наклону восходящей ветви кривой зависимости удельного расхода от интенсивности подачи можно уточнить значение показателя степени. Вначале принимаем, что $n = 1,0$. Тогда, полагая, что $h = h_0$ при $J = J_{кр}$, из формулы (4) получим:

$$\beta = h_0 / J_{кр}^n. \quad (5)$$

Соответственно, средняя толщина тушащего слоя

$$h = h_0 \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right]. \quad (6)$$

Перепишав формулу (3) с учетом (6), получим:

$$\tau = - \frac{\rho h_0}{J_{кр}} \left[1 + \left(\frac{J}{J_{кр}} \right)^n \right] \ln \left(1 + \frac{J_{кр}}{J} \right). \quad (7)$$

Для определения удельного расхода огнетушащего вещества Q (кг/(м²·с)) время тушения умножаем на соответствующую интенсивность подачи:

$$Q = J\tau. \quad (8)$$

Описание полученных результатов с помощью формул (7) и (8) проводят построением кривых зависимости времени тушения и минимального удельного расхода от интенсивности подачи ОТВ.

Если тушение пламени происходит не распыленной струей вещества, а водяным туманом или фреоном, то следовало бы пересчитать массу жидкости в объем газа, например, по формуле [20]:

$$q_v = q_m \cdot 22,4 / M_{ОТВ}, \quad (9)$$

где q_v — расход газа, м³/с;

q_m — массовый расход водяной струи, кг/с;

$M_{ОТВ}$ — молярная масса ОТВ;

22,4 — мольный объем, м³/кмоль.

При использовании формул (7) и (8) для веществ, превращающихся в пар, необходимо плотность, представленную в числителе, и критическую интенсивность (в знаменателе) умножить на $22,4 / M_{ОТВ}$, чтобы перевести жидкость в пар. Точно так же отношение интенсивностей под логарифмом необходимо умножить на тот же множитель. Однако даже если произвести данные операции, это ничего не изменит, поскольку множители в числителе и знаменателе сократятся. Следовательно, анализ формул (7) и (8) для определения соответственно времени тушения и удельного расхода огнетушащего вещества

можно выполнять без перевода массовых единиц в объемные.

На конкретной модели тушения пламени бензина распыленной водой высокой степени дисперсности проведем описание экспериментальных результатов зависимости времени тушения и удельного расхода воды от интенсивности ее подачи, на основе которых определим оптимальную интенсивность подачи и минимальный удельный расход распыленной воды. Акцент на высокую степень дисперсности делается для того, чтобы считать, что вся вода, поданная на тушение пламени, после прохождения пламенной зоны превращается в пар, т. е. коэффициент превращения воды в пар равен единице.

Удельный расход распыленной воды, затраченной на тушение пламени, рассчитывали умножением времени тушения на соответствующую интенсивность подачи распыленной воды по формуле (8).

Анализ формул (7) и (8) показывает, что умножением времени тушения на соответствующую интенсивность подачи распыленной струи удастся получить экстремальную зависимость удельного расхода огнетушащего вещества от интенсивности его подачи. Этот эффект обнаружен во всех экспериментах по тушению пламени углеводородов распыленной водой, распыленным фреоном или огнетушащим порошком.

Определение удельной скорости потерь осуществляется исходя из скорости выгорания и флегматизирующей концентрации ОТВ. Расчет может дать хорошие результаты, если весь поток распыленного огнетушащего вещества превращается в пар. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов, полученных с помощью формул (7) и (8), представлены на рис. 1.

Если принять, что при дисперсности распыленной воды менее 20 мкм весь поток при прохождении через фронт пламени превращается в пар, то критическая интенсивность может быть определена умножением удельной скорости выгорания жидкости на флегматизирующую концентрацию водяного пара и коэффициент его использования. Если скорость выгорания бензина равна 0,05 кг/(м²·с), а флегматизирующая концентрация водяного пара в смеси паров бензина и воздуха составляет 35 %, то критическая интенсивность

$$J_{кр} = U u_m \varphi_T = 0,05 \cdot 0,35 \cdot 1,0 = 0,0175 \text{ кг/(м}^2\text{·с)}. \quad (10)$$

На рис. 1 представлена экспериментально полученная зависимость времени тушения пламени гептана и удельного расхода распыленной воды высокой степени дисперсности (со средним размером капель 20 мкм). Сопоставление этой зависимости с рассчитанной по принятой модели дало удовлетворительное совпадение.

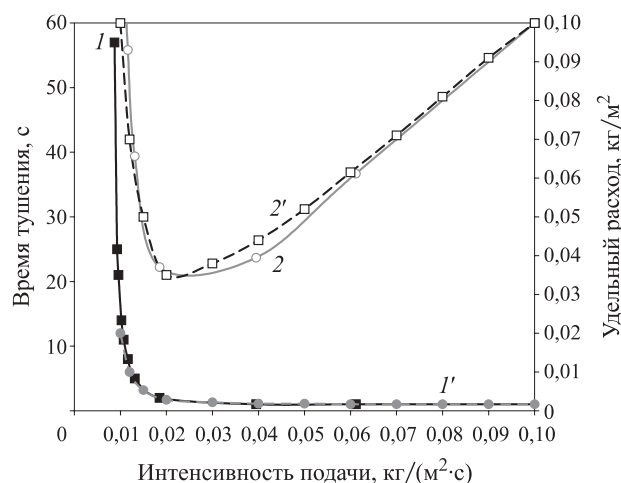


Рис. 1. Зависимость времени тушения пламени дизельного топлива (I , I') и удельного расхода (2 , $2'$) распыленной воды со средним размером капель 20 мкм: I , 2 — эксперимент; I' , $2'$ — расчет

Описание полученных результатов с помощью формул (7) и (8) проводят путем графического построения кривых зависимости времени тушения и минимального удельного расхода от интенсивности подачи, например, пенообразующего раствора. Критическую интенсивность при тушении распыленными огнетушащими веществами определяют по формуле (10). Если же это невозможно, то используют величину, полученную из графика, построенного на основе экспериментальных измерений. Затем вводят показатель степени, равный единице, и ориентировочные значения минимальной толщины флегматизированного слоя и его средней плотности. При этом ориентируются на ход кривой зависимости удельного расхода от интенсивности подачи. Если кривые не совпадают по наклону восходящей ветви кривой удельного расхода, то изменяют показатель степени. Если не совпадает минимальный удельный расход, то меняют минимальную толщину флегматизированного слоя. Последовательным подбором значений параметров, входящих в формулу (7), можно получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

По результатам описания результатов эксперимента можно объяснить различие в поведении разных веществ при тушении нефтепродуктов. Судя по наклону восходящей ветви кривой зависимости удельного расхода от интенсивности подачи, представленной на рис. 1, показатель степени в расчетной формуле равен 1,2. Используя различные сочетания критической интенсивности и минимальной толщины слоя водяного пара, удастся получить удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с результатами расчета по предложенным формулам (7) и (8).

При описании результатов эксперимента по тушению пламени дизельного топлива распыленной водой с размером капель 20 мкм использовали следующие параметры:

Критическая интенсивность подачи воды, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,014
Толщина слоя в месте падения струи, м	0,01
Плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,80
Степень n	1,20

Рассмотрим тушение пламени бензина струей распыленного фреона 114B2. Несмотря на ограничения, введенные в связи с негативным воздействием этого фреона на озоновый слой Земли, он является наиболее эффективным средством тушения пожара, поскольку его флегматизирующая концентрация составляет 3–4 %.

Во всех исследованных случаях тушения фреоном при подаче его распыленной струи вначале происходило резкое увеличение объема факела пламени, что обусловлено дополнительным притоком кислорода воздуха, увлекаемого распыленной струей. В дальнейшем слой пара фреона растекался по всей поверхности жидкости и тем самым обеспечивал прекращение горения.

Процесс тушения дизельного топлива фреоном имеет особенность, которая связана с опусканием зоны горения непосредственно к горячей поверхности углеводорода. Капли фреона размером 20 мкм испаряются при прохождении через зону горения. Как и в случае с распыленной водой, основание струи фреона взаимодействует с локальным участком пламени и испаряется. Далее поток пара достигает поверхности жидкости и начинает растекаться по горячей поверхности в виде тонкого слоя смеси фреона с воздухом и паром нефтепродукта. Поскольку концентрация флегматизатора выше МФКФ, слой вместе с паром поступает в зону горения и тушит пламя.

Результаты экспериментальных измерений и расчетов по формулам (7) и (8) времени тушения и удельного расхода фреона при тушении пламени дизельного топлива представлены на рис. 2.

При описании результатов эксперимента по тушению пламени дизельного топлива фреоном 114B2 со средним размером частиц 20 мкм использовали следующие параметры:

Критическая интенсивность подачи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,007
Толщина слоя в месте падения струи, мм	2,5
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	6,5
Степень n	1,0

При использовании в расчетах данных параметров наблюдается хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными.

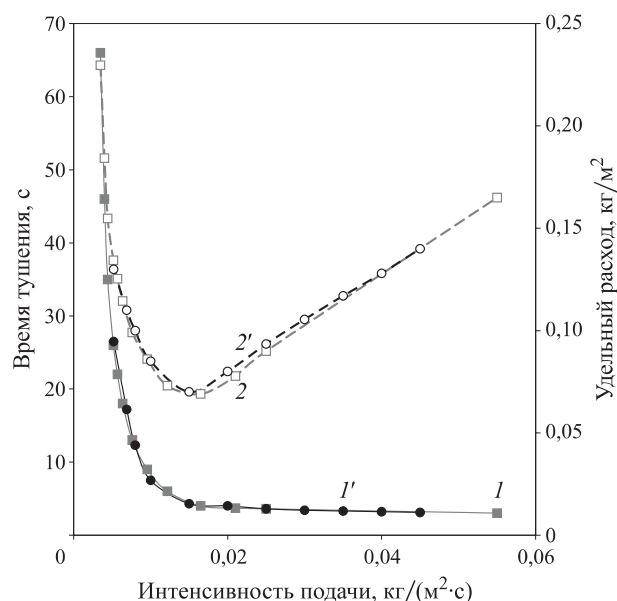


Рис. 2. Зависимость времени тушения пламени бензина (1, 1') и удельного расхода (2, 2') фреона 114В2 со средним размером частиц 20 мкм: 1, 2 — эксперимент; 1', 2' — расчет

Рассмотрим тушение пламени бензина огнетушащим порошком. Прежде всего отметим, что его подача по трубкам малого диаметра затруднительна, поэтому необходимо использовать порошок более грубой дисперсности. Для эксперимента проведем диспергирование порошка перед подачей его с помощью воздуха в зону горения. Поскольку размер частиц порошка неоднороден, то и состав порошковой струи, подаваемой в очаг горения, будет неоднородным. Результаты эксперимента нанесем на диаграмму зависимости времени тушения и удельного расхода порошка от интенсивности его подачи. Удельный расход определяется делением секундного расхода на площадь горящей жидкости. Основная сложность заключается в обеспечении постоянства расхода порошка в процессе тушения пламени.

Подача порошка на факел пламени производится в виде струи с дозированной концентрацией, а прекращается в момент тушения пламени. Взвешиванием определяют убыль массы порошка, поданного на тушение пламени. Обеспечить постоянство концентрации порошка сложно, поэтому измерения проводят многократно, а их результаты наносят на диаграмму зависимости удельного расхода порошка от интенсивности его подачи.

На рис. 3 представлены фрагменты процесса тушения пламени распыленной струей порошка. В момент подачи распыленной струи факел пламени резко увеличивается в размерах за счет дополнительного притока кислорода воздуха, который увлекается в зону горения. Затем пламя постепенно вытесняется слоем порошка с воздухом. Поскольку концентрация порошка выше огнетушащей, то горение посте-



Рис. 3. Фрагменты тушения бензина порошком дисперсностью 80 мкм: а — воздух, увлекаемый струей порошка, раздувает факел пламени; б — формируется слой порошка над горячей поверхностью бензина

пенно прекращается на всей поверхности нефтепродукта.

Результаты эксперимента, оформленные в виде зависимости времени тушения пламени бензина и удельного расхода порошка со средним размером частиц 80 мкм от интенсивности его подачи, представлены на рис. 4.

При описании результатов эксперимента по тушению пламени дизельного топлива порошком “Вексон 24” со средним размером частиц 80 мкм использовались следующие параметры:

Критическая интенсивность подачи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,165
Толщина слоя в месте падения струи, м	3,0
Плотность порошка, $\text{кг}/\text{м}^3$	120
Степень n	0,85

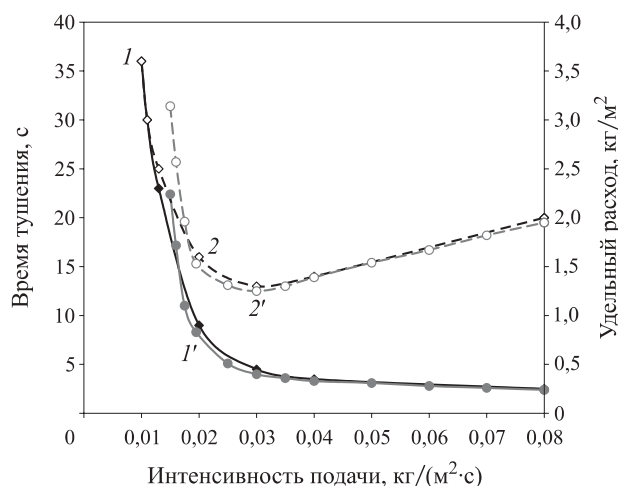


Рис. 4. Зависимость времени тушения пламени бензина (I , I') и удельного расхода (2 , $2'$) огнетушащего порошка со средним размером частиц 80 мкм от интенсивности подачи порошковой струи: 1 , 2 — эксперимент; $1'$, $2'$ — расчет по формулам (7) и (8)

Наблюдается хорошее совпадение расчета с экспериментом, что подтверждает правильность принятой модели тушения, предусматривающей локальный механизм тушения с постепенным распространением флегматизированного слоя по горячей поверхности жидкости.

Результаты систематических исследований процесса тушения нефти подачей струи воздуха в основание резервуара, проводившихся в 50-е годы прошлого столетия, представлены в работах Блинова – Худякова [15, 16]. Так как в этот период добывали нефть с высокой температурой вспышки, то наиболее эффективным методом тушения нефти в резервуаре представлялся метод перемешивания, в частности подачей воздуха в основание резервуара. Однако поскольку этот метод оказался применимым только для тушения пожаров нефти и нефтепродуктов с высокой температурой вспышки, таких как керосин и дизельное топливо, то интерес к нему постепенно снижался, и сейчас он используется только в исследовательской практике.

Представляется интересным проверить возможность описания процесса тушения пламени дизельного топлива подачей струи воздуха в основание резервуара с помощью типовых формул (7) и (8). Согласно этой модели, как и в предыдущих случаях, тушение достигается распространением по горячей поверхности холодного тушащего слоя жидкости, температура которой ниже температуры вспышки. При подаче струи воздуха в основание резервуара вверх увлекается масса жидкости из нижних слоев нефтепродукта. По мере растекания “холодного” слоя жидкости по горячей поверхности снижается скорость ее испарения и, соответственно, уменьшается тепловой поток от факела пламени к горячей

поверхности. Пламя будет потушено, если вся поверхность горячей жидкости будет покрыта слоем “холодной” жидкости.

Технология анализа основана на рассмотрении материального баланса жидкости, поступающей в поверхностный слой и опускающейся из поверхностного слоя за счет конвективных потоков, формируемых восходящим потоком воздуха, и из-за разницы плотностей “холодной” и горячей жидкости.

При анализе результатов эксперимента основная трудность связана с определением интенсивности потока жидкости, образуемого струей поднимающихся пузырей воздуха. Судя по работам [13, 14], эта зависимость при невысоких расходах воздуха близка к линейной, при этом количество поднимающегося раствора в 7–10 раз меньше расхода воздуха, измеренного в объемных единицах.

Для анализа использовали результаты экспериментов по тушению пламени дизельного топлива, полученные на стендовой установке и взятые из литературных источников [13, 14].

Результаты экспериментальных измерений времени тушения в зависимости от интенсивности подачи воздуха при тушении пламени дизельного топлива в полигонных условиях и на стендовой установке представлены на рис. 5. Здесь же показана зависимость удельного расхода воздуха, рассчитанная по формулам (7) и (8).

При описании процесса тушения пламени дизельного топлива подачей воздуха в основание резервуара возникает обратная по сравнению с распыленной водой ситуация. Если в случае с распыленной водой тушение происходит за счет слоя пара, образующегося в результате испарения капель воды (т. е. при переходе из жидкости в пар), то при туше-

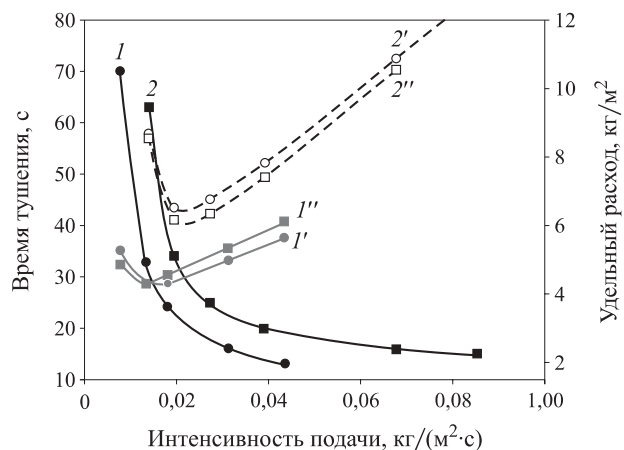


Рис. 5. Зависимость времени тушения дизельного топлива (I , 2) и удельного расхода воздуха (I' , I'' , $2'$, $2''$) подачи его в основание резервуара при тушении на полигоне (I , I' , I'') и на стендовой установке (2 , $2'$, $2''$): I' , $2'$ — эксперимент; I'' , $2''$ — расчет по формулам (7) и (8) (I , 2 — результаты, заимствованные из работ Блинова – Худякова)

нии подачи воздуха его струя увлекает за собой поток жидкости. Как и в предыдущем случае, исходным является расход воздуха, который увлекает за собой вверх холодные слои нефтепродукта. Тушение пламени произойдет после того, как вся поверхность горения покроется слоем углеводорода, температура которого ниже температуры воспламенения.

При сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными была оценена толщина “холодного” слоя на поверхности дизельного топлива. Она составила 2,0 мм в стендовых испытаниях и 2,5 мм — в полигонных. Показатель степени изменялся от 0,78 до 0,73, соответственно, изменялись и оптимальная интенсивность подачи и минимальный удельный расход воздуха (табл. 1).

Тушение пожаров нефтепродуктов проводят с использованием пены, полученной на основе углеводородных и фторированных пенообразователей. Пену на основе углеводородных пенообразователей подают на горящую поверхность, а на основе фторсодержащих пенообразователей — в основание резервуара, непосредственно в горючую жидкость.

Рассмотрим процесс тушения пламени гептана подачей пены на горящую поверхность и в слой нефтепродукта. Для описания результатов эксперимента по предлагаемым формулам (7) и (8) используются данные по процессу тушения пламени пеной, полученной из углеводородных и фторированного пенообразователей. 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,

проверяли поверхностную активность рабочих водных растворов на границе с гептаном.

Сопоставление результатов расчета по формулам (7) и (8) с экспериментальными данными при тушении пламени бензина подачей пены, полученной из фторированного пенообразователя, на горящую поверхность и в основание резервуара приведено на рис. 6.

Основные параметры, входящие в уравнение тушения пламени бензина фторсодержащим пленкообразующим пенообразователем, даны в табл. 2.

Результаты тушения бензина пеной низкой кратности, полученной из растворов углеводородного пенообразователя, при подаче ее на горящую поверхность и в слой углеводорода, а также пеной, полученной из фторсодержащего пленкообразующего пенообразователя, при подаче в основание резервуара представлены на рис. 7.

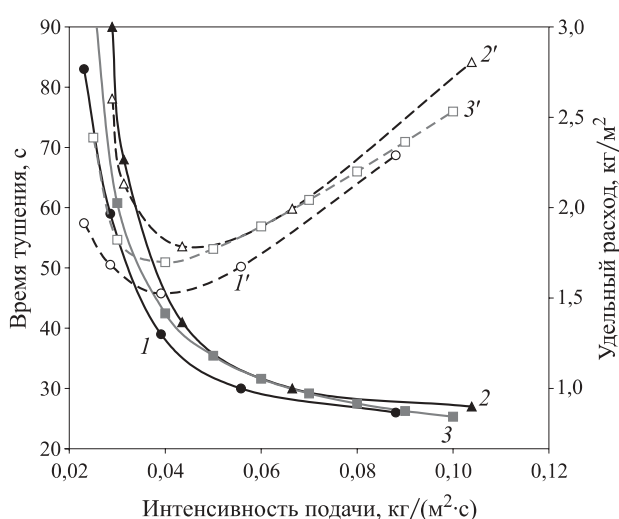


Рис. 6. Зависимость времени тушения бензина (1–3) и удельного расхода (1'–3') пены из фторированного пенообразователя при ее подаче в слой горючего (1, 1') и на его поверхность (2, 2'): 1, 1', 2, 2' — эксперимент; 3, 3' — расчет по формулам (7) и (8)

Таблица 1. Основные параметры процесса тушения дизельного топлива подачей пены на горящую поверхность и в основание резервуара

Параметр	Значение параметра при испытаниях	
	на стендовой установке	на полигоне
Критическая интенсивность подачи $J_{кр}$, л/(м²·с)	0,0105	0,08
Оптимальная интенсивность подачи $J_{опт}$, л/(м²·с)	0,22	0,15
Минимальный расход Q_{min} , л/м²	6,3	4,3
Плотность дизельного топлива, кг/м³	800	800
Толщина слоя в месте падения пены, мм	1,75	1,45
Показатель степени n	0,78	0,73

Таблица 2. Основные параметры процесса тушения бензина пеной, полученной из растворов фторсодержащего пленкообразующего пенообразователя, подачей ее на горящую поверхность и в основание резервуара

Параметр	Значение параметра при подаче пены	
	на поверхность	в основание резервуара
Критическая интенсивность подачи, кг/(м²·с)	0,018	0,040
Кратность пены	10	10
Плотность пены, кг/м³	1000	1000
Показатель степени n	0,68	0,75

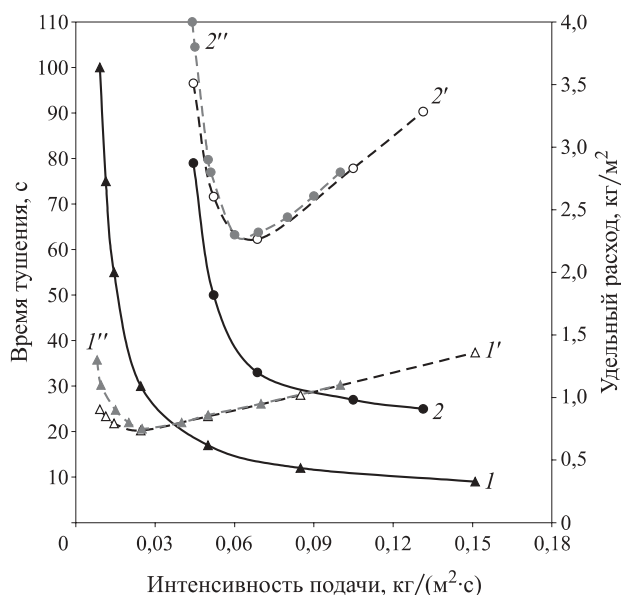


Рис. 7. Зависимость времени тушения бензина (I , 2) и удельного расхода (I' , I'' , $2'$, $2''$) пены низкой кратности, полученной из фторированного (I , I' , I'') и углеводородного (2 , $2'$, $2''$) пенообразователей: I , I' , 2 , $2'$ — эксперимент; I'' , $2''$ — расчет по формулам (7) и (8)

Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета по типовым формулам (7) и (8) показало их удовлетворительное совпадение при тушении пламени пеной различной природы и при различных способах ее подачи.

Выводы

На основе анализа результатов экспериментов по тушению пламени горючих жидкостей предложена модель процесса тушения, которая включает локальное взаимодействие основания распыленной струи воды грубой и тонкой дисперсности, водных пленкообразующих растворов, химически активных хладонов, порошковых составов различной степени дисперсности, твердых аэрозолей с участком факела пламени и далее растекание флегматизированного слоя жидкости по горящей поверхности.

Показана возможность применения типовых расчетных соотношений для описания процесса тушения пламени как распыленными струями, так и пеной при подаче на горящую поверхность и в слой нефтепродукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольченко Д. А. Универсальность механизмов тушения огнетушащими веществами // Техника и технология: новые перспективы развития. — 2015. — № XVIII. — С. 35–40.
2. Корольченко Д. А. Анализ двойственного механизма тушения пламени // Техника и технология: новые перспективы развития. — 2015. — № XVIII. — С. 28–34.
3. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М.: Изд. дом “Калан”, 2002. — 448 с.
4. Кузнецов Г. В., Куйбин П. А., Стрижак П. А. Движение капель мелкодисперсной жидкости в потоке высокотемпературных газов // Теплофизика и аэромеханика. — 2014. — Т. 21, № 5. — С. 637–645.
5. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Влияние начальных параметров распыленной воды на характеристики ее движения через встречный поток высокотемпературных газов // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, № 7. — С. 15–23.
6. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1070–1072. — P. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
7. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М.: Пожнаука, 2007. — 267 с.
8. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Особенности тушения пламени высокодисперсными газоаэрозольными системами // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 10. — С. 67–72.
9. Абдурагимов И. М., Говоров В. И., Макаров Е. В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. — М.: ВИПТШ МВД РФ, 1988. — 255 с.
10. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н. Огнетушащая эффективность пены низкой кратности // Научное обозрение. — 2015. — № 8. — С. 114–120.
11. Шароварников А. Ф., Мельников А. И. Экспериментальные исследования огнетушащей способности водных пленкообразующих растворов фторированных поверхностно-активных веществ // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 9. — С. 74–81. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.74-81.
12. 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.
13. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н., Власов Н. А., Мельников А. И. Тушение пламени горючих жидкостей химически активным ингибитором // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 11. — С. 70–76. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.70-76.

14. Корольченко Д. А., Дегаев Е. Н., Шароварников А. Ф. Горение гептана в модельном резервуаре // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 2. — С. 67–70.
15. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Диффузионное горение жидкостей. — М. : АН СССР, 1961. — 208 с.
16. Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Изд. МКХ РСФСР, 1961. — 143 с.
17. Cortina T. The safety & benefits of AFFF agents. Special analysis: Foam // Industrial Fire Journal. — June 2007. — No. 68. — P. 70–75.
18. Cortina T. The phaseout that didn't happen. AFFF foams move into the future // International Fire Protection. — May 2010. — P. 29–33.
19. 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.
20. 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.

Материал поступил в редакцию 25 декабря 2015 г.

Для цитирования: Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Анализ типового соотношения для описания зависимости времени тушения горючих жидкостей и удельного расхода различных огнетушащих веществ от интенсивности их подачи // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 66–76. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.

English

ANALYSIS OF A TYPICAL RELATION USED FOR DESCRIPTION OF DEPENDENCE OF THE EXTINGUISHING TIME OF FLAMMABLE LIQUIDS AND THE SPECIFIC CONSUMPTION OF VARIOUS EXTINGUISHING AGENTS ON THEIR FLOW RATE

KOROLCHENKO D. A., Candidate of Technical Sciences, Head 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)

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

On the basis of analysis of experimental data on extinguishing of flammable liquids it is offered the model of extinguishing process which includes local interaction of the base of dispersed stream with part of a flame jet and further spreading of extinguishing layer on the burning surface of oil product. The basis of analysis is a dual suppression mechanism of fire extinguishing agents. The dual suppression mechanism is universal and is especially strongly revealed during extinguishing of flammable liquids by dispersed streams of water and freon, by stream of powder and air, by foam giving into the bottom of burning tank with oil product. The dual mechanism is accompanied by fact that the stream of agent carries away atmospheric oxygen that sharply increases volume of flame jet at the initial stage of stream supplying. Taking into account action of inflow of additional air we can reveal the nature of extreme dependence of specific consumption on flow rate of extinguishing agent and existence of its optimal flow rate during fire extinguishing. Material balance of extinguishing process of hydrocarbon flame using method of covering of the burning surface by layer of fire extinguishing agent (FEA) is considered. As a result, it was defined that the thickness of layer in the place where stream falls onto the burning surface depends on flow rate of dispersed stream. Dependence of average thickness of extinguishing layer on flow rate of stream is offered. Based on the results of experiment, conducted on specific model of extinguishing of gasoline flame using water with

high dispersion degree, it was described dependence of specific consumption of FEA and extinguishing time on its flow rate. This allowed us to determine the optimal flow rate and the minimal specific consumption of dispersed water. The analysis of formulas, deduced during research, shows that multiplication of extinguishing time by corresponding value of flow rate of dispersed stream allow to obtain the extreme dependence of specific consumption of extinguishing agent on its flow rate. This effect was found in all experiments on fire extinguishing of hydrocarbons by dispersed water, dispersed freon or extinguishing powder. The analysis of extinguishing of gasoline flame by dispersed freon 114B2 and fire extinguishing powder is carried out. Process of extinguishing of a heptane flame by giving of foam onto the burning surface and into the layer of oil product is considered. It is shown that description of extinguishing process of diesel fuel due to giving of air into the bottom of tank reveal the reverse, as compared with dispersed water, situation. In case of application of dispersed water, extinguishing process is realized due to the steam layer which is formed as a result of evaporation of water drops. If extinguishing is realized due to the giving of air, its stream carries away the flow of liquid. As in the previous case, the initial value is a flow rate of air which carries out cold layers of oil product to the upper level. Suppression of flame will occur when the entire burning surface will be covered by hydrocarbon layer which temperature is lower than temperature of ignition. To describe the experimental results it is offered the formula which includes data of the process of fire extinguishing using foams formed from hydrocarbon agents and from fluorinated agents. Possibility of creation of the standard equation which describe dependence of specific consumption and extinguishing time on flow rate of extinguishing agents of different nature is shown. Possibility of determination of the optimal flow rate and the minimal specific consumption of fire extinguishing agent, irrespective of its nature, and possibility of application of the standard calculated ratio for description of the process of extinguishing as by dispersed streams, so by foam giving onto the burning surface and into the layer of oil product are shown.

Keywords: model of extinguishing process; specific consumption; extinguishing time; flow rate; fire extinguishing agents; mechanism of extinguishing.

REFERENCES

1. Korolchenko D. A. Universalnost mekhanizmov tusheniya ognetushashchimi veshchestvami [Universality of mechanisms of fire suppression by extinguishing agents]. *Tekhnika i tekhnologiya: novyye perspektivy razvitiya — Equipment and Technology: New Prospects of Development*, 2015, no. XVIII, pp. 35–40.
2. Korolchenko D. A. Analiz dvoystvennogo mekhanizma tusheniya plameni [Analysis of the dual fire suppression mechanism]. *Tekhnika i tekhnologiya: novyye perspektivy razvitiya — Equipment and Technology: New Prospects of Development*, 2015, no. XVIII, pp. 28–34.
3. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P., Voevoda S. S., Sharovarnikov S. A. *Tusheniye pozharov nefti i nefteproduktov* [Fire extinguishing of oil and oil products]. Moscow, Kalan Publ., 2002. 448 p.
4. Kuznetsov G. V., Kuibin P. A., Strizhak P. A. Motion of fine-spray liquid droplets in hot gas flow. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 609–616. DOI: 10.1134/s0869864314050096.
5. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 59, no. 7, pp. 959–967. DOI: 10.1134/s1063784214070263.
6. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Heat balance of extinguishing process of flammable liquid by sprayed water. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1070–1072, pp. 1794–1798. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1070-1072.1794.
7. Gorshkov V. I. *Tushenie plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing of combustible liquids' flame]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 267 p.
8. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Osobennosti tusheniya plameni vysokodispersnymi gazo-aero-zolnymi sistemami [Features of fire extinguishing by finely dispersed gas-aerosol systems]. *Pozharo-vzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 10, pp. 67–72.
9. Abduragimov I. M., Govorov V. I., Makarov Ye. V. *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 Russia Publ., 1988. 255 p.

10. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N. Ognetchashchaya effektivnost peny nizkoy kratnosti [Fire extinguishing effectiveness of low multiplicity foam]. *Nauchnoye obozreniye — Science Review*, 2015, no. 8, pp. 114–120.
11. Sharovarnikov A. F., Melnikov A. I. Eksperimentalnyye issledovaniya ognetchashchey sposobnosti vodnykh plenkoobrazuyushchikh rastvorov fluorirovannykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Experimental studies of fire extinguishing capacity of the water film forming solutions containing fluorinated surfactants]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 74–81. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.74-81.
12. 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 72–76.
13. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Degaev E. N., Vlasov N. A., Melnikov A. I. Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey khimicheski aktivnym ingibitorom [Suppression of a flame of combustible liquids by reaction inhibitor]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 11, pp. 70–76. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.70-76.
14. Korolchenko D. A., Degaev E. N., Sharovarnikov A. F. Goreniye heptana v modelnom rezervuare [Combustion of heptane in a model tank]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 2, pp. 67–70.
15. Blinov V. I., Khudyakov G. N. *Diffuzionnoye goreniye zhidkostey* [Diffusion burning of liquids]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 1961. 208 p.
16. Petrov I. I., Reutt V. Ch. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Suppression of combustible liquids flame]. Moscow, Ministry of Utilities Sector Publ., 1961. 143 p.
17. Cortina T. The safety & benefits of AFFF agents. Special analysis: Foam. *Industrial Fire Journal*, June 2007, no. 68, pp. 70–75.
18. Cortina T. The phaseout that didn't happen. AFFF foams move into the future. *International Fire Protection*, May 2010, pp. 29–33.
19. 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.
20. 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.

For citation: Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Analiz tipovogo sootnosheniya dlya opisaniya zavisimosti vremeni tusheniya goryuchikh zhidkostey i udelnogo raskhoda razlichnykh ognetchashchikh veshchestv ot intensivnosti ikh podachi [Analysis of a typical relation used for description of dependence of the extinguishing time of flammable liquids and the specific consumption of various extinguishing agents on their flow rate]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 66–76. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.66-76.