

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)

УДК 614.84.664

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ДИСПЕРСНЫМИ ОГNETУШАЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ И ПЕНОЙ НИЗКОЙ КРАТНОСТИ

Приведены результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований процесса тушения пламени углеводородов различными типами огнетушащих веществ, включая распыленную воду, огнетушащий порошок, химически активный фреон и пену низкой кратности. На основе результатов экспериментальных исследований процесса тушения струями дисперсных огнетушащих веществ и пены низкой кратности предложен и обоснован “локальный” механизм тушения пламени жидкостей огнетушащими веществами. Экспериментально показано и теоретически обосновано существование минимума на кривых зависимости удельного расхода от интенсивности в области оптимальной интенсивности подачи огнетушащего средства. Предложены типовые уравнения для расчета времени и удельного расхода при тушении пламени горючих жидкостей с использованием различных типов огнетушащих веществ. Показано удовлетворительное совпадение результатов эксперимента с расчетом по формулам, соответствующим “локальному” механизму тушения пламени огнетушащими веществами.

Ключевые слова: огнетушащие вещества; распыленная вода; огнетушащий порошок; химически активный фреон; пена низкой кратности; механизм тушения пламени.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.51-58

Общепринятый подход к анализу процесса тушения пламени дисперсными системами подразумевает сопоставление тепла, выделяемого пламенем горящих паров, с теплом, затраченным на фазовые превращения огнетушащего вещества (ОТВ) [1, 2]. Считается, что огнетушащее вещество (например, вода высокой степени дисперсности) способно поглощать половину теплового потока, выделяющегося при горении, что приводит к потуханию пламени [3, 4].

Первые сомнения в такой способности огнетушащих веществ возникли при расчете теплового баланса порошка, а в дальнейшем и распыленной воды: получился большой перевес в сторону тепла, выделяющегося при горении пламени. Количества порошка или распыленной воды оказывается недостаточно для поглощения половины теплового потока от пламени. Если представить ситуацию, в которой при тушении пламени гептана (низшая теплота сгорания 40 000 кДж/кг, скорость выгорания 0,04 кг/(м·с)) интенсивность подачи распыленной струи составляет 0,1 кг/(м²·с), то при полном испарении воды и удельной теплоте испарения 2300 кДж/кг удастся поглотить только шестую часть тепла, выделяемого в реакции горения паров гептана в воздухе.

Эксперименты показали, что тушение пламени гептана при указанной интенсивности подачи воды

происходит успешно. На рис. 1 представлены результаты эксперимента по тушению пламени гептана водой различной степени дисперсности.

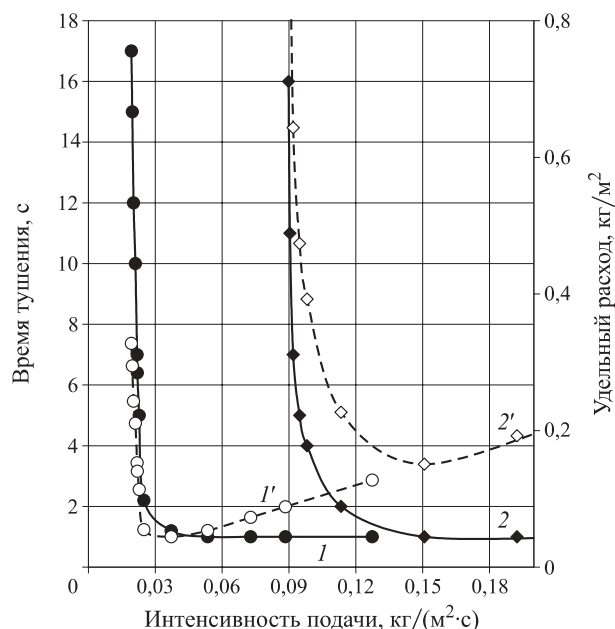


Рис. 1. Зависимость времени тушения гептана (I, 2) и удельного расхода (I', 2') распыленной струи воды дисперсностью 20 мкм (I, I') и 80 мкм (2, 2')

Оказалось, что тушение достигается при небольших расходах воды. При уменьшении размера капель с 80 до 20 мкм интенсивность подачи воды, при которой обеспечивается тушение пламени, снижается с 0,15 до 0,04 кг/(м²·с), т. е. почти в 4 раза [5, 6].

Результаты экспериментов по тушению пламени огнетушащим порошком выявили наличие минимума на кривых зависимости удельного расхода от интенсивности подачи порошка (рис. 2 и 3). Первые указания на существование такой закономерности на основе качественных измерений были даны в работе [7]. Как следует из результатов экспериментов, тушение пламени гептана достигается при интенсивности подачи порошка от 0,15 до 0,10 кг/(м²·с) [8] и только при тушении по особому — “локальному” механизму, когда на фронт порошка действует только небольшая часть тепла факела пламени.

При анализе процесса тушения пламени порошком различие в количестве выделенной в результате реакции горения и поглощенной в процессе тушения теплоты обычно относят к наличию особого механизма тушения — ингибирования процесса горе-

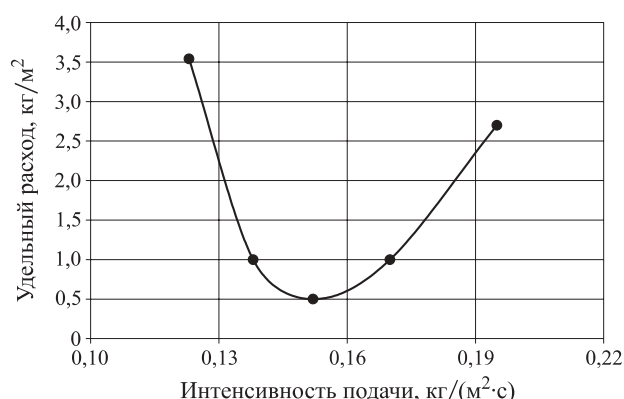


Рис. 2. Зависимость удельного расхода перемолотой смеси карбамида и бикарбоната натрия в соотношении 1:1 с диаметром частиц 40 мкм от интенсивности ее подачи при тушении пламени бензина

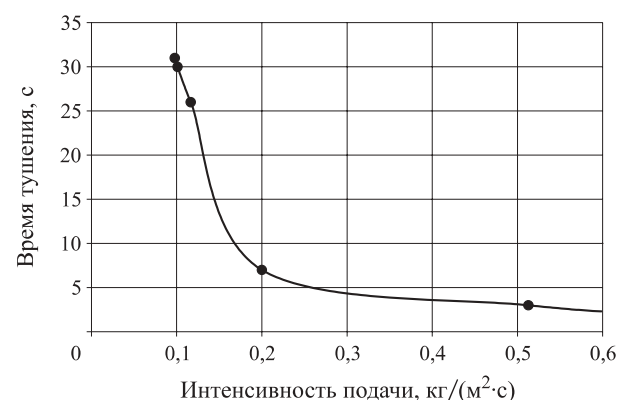


Рис. 3. Зависимость времени тушения пламени бензина от интенсивности подачи порошка со средним размером частиц 110 мкм из огнетушителя ОП-4

ния [9, 10]. Однако механизм ингибирования неясен до настоящего времени.

Аналогичный результат получен при экспериментальном исследовании процесса тушения пламени углеводородов высококипящим фреоном (с температурой кипения около 60 °С), поданным в очаг горения струями различной дисперсности. На рис. 4 и 5 представлены результаты тушения гептана, дизельного топлива и этанола фреоном 114B2.

Тушение достигалось при небольших интенсивностях подачи фреона, которые снижались в два раза при увеличении дисперсности с 80 до 20 мкм. Абсолютная величина интенсивности была очень низкой и изменялась от 0,05 до 0,008 кг/(м²·с). Такое коли-

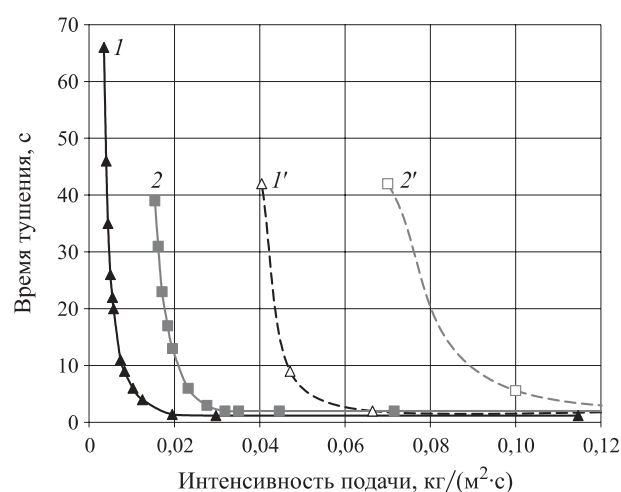


Рис. 4. Зависимость времени тушения пламени дизельного топлива (I , I') и гептана (2 , $2'$) фреоном 114B2 дисперсностью 20 мкм (I , 2) и 80 мкм (I' , $2'$) от интенсивности его подачи

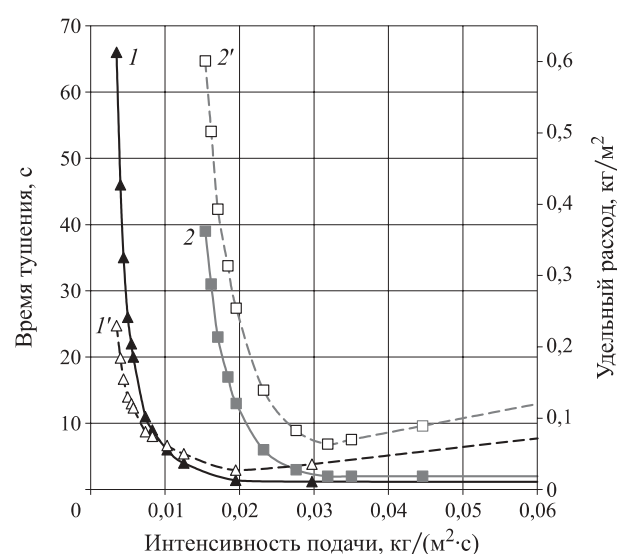


Рис. 5. Зависимость времени тушения (I , 2) и удельного расхода фреона 114B2 (I' , $2'$) при тушении пламени дизельного топлива (I , I') и гептана (2 , $2'$) от интенсивности подачи фреона со средней дисперсностью 20 мкм

чество фреона не может отнять заметное количество тепла от факела пламени в целом, но способно эффективно снизить температуру на локальном участке горячей жидкости. Такие результаты свидетельствуют о локальном механизме взаимодействия факела пламени с фронтом распыленного огнетушащего вещества.

Анализ результатов тушения распыленной водой показывает, что происходит поглощение огнетушащим веществом половины общего количества тепла, выделяемого при горении ГЖ. Это требует анализа процесса тушения с иных позиций.

В связи с этим предлагается механизм тушения, который предусматривает два этапа. Первый — взаимодействие потока огнетушащего вещества с частью факела пламени, которая соприкасается с фронтом ОТВ. В этом случае поток огнетушащего вещества взаимодействует только с небольшим (локальным) участком пламени, в результате чего происходит поглощение не только половины тепла от факела на этом участке, но и практически охлаждение его до температуры, близкой к температуре кипения воды. Это вызывает прекращение горения непосредственно на фронте движения огнетушащей струи. Такой “локальный” механизм взаимодействия струи распыленной воды с пламенем приводит к испарению большей или меньшей части струи в зависимости от ее дисперсности.

Второй этап процесса тушения распыленной водой предусматривает “растекание” водяного пара по горячей поверхности слоем определенной толщины. Чем выше дисперсность распыленной воды, тем больше объем водяного пара и тем выше скорость покрытия им горячей поверхности. Аналогичный механизм процесса тушения пламени реализуется при использовании распыленного фреона, распыленного порошка и твердого аэрозоля, а также пены низкой кратности. Характерной особенностью начала процесса тушения распыленным потоком ОТВ является резкое увеличение объема факела пламени, что объясняется наличием эжектируемого дополнительного потока кислорода воздуха [11–14].

Механизм тушения пламени горючих жидкостей пеной низкой кратности сводится в основном ко второму этапу, когда определяющим является процесс растекания пены по горячей поверхности. Первый этап тоже может присутствовать, если пену подают на горящую поверхность с большой высоты, через факел пламени. Здесь также имеет место локальное взаимодействие падающей струи пены с участком факела пламени, а разрушение пены происходит через потери ее части при соприкосновении с небольшим участком факела пламени.

Тушение пламени достигается после растекания пены слоем определенной толщины, вплоть до со-

прикосновения с нагретой стенкой резервуара. Первые порции пены, падающие на горящую поверхность, взаимодействуют только с локальным потоком тепла от факела пламени. Здесь тепловой поток относится ко всей площади поверхности горения, поэтому удельный поток тепла оказывается значительно меньше всего теплового потока, выделяемого факелом пламени.

Тепловой поток, поступающий от факела пламени, можно оценить по количеству тепла, необходимому для испарения жидкости в процессе горения [4]. Величина теплового потока, падающего на поверхность горения, в 15–20 раз меньше теплового эффекта горения паров в воздухе, поэтому пена растекается по горячей поверхности, только частично разрушаясь как под действием тепла пламени, так и в результате контактного взаимодействия с нагретой поверхностью горячей жидкости [15].

При испытаниях рассмотренных выше огнетушащих веществ процесс тушения пламени горючей жидкости завершается растеканием тушащего слоя вещества по всей горячей поверхности. Следовательно, материальный баланс огнетушащего вещества в процессе тушения пламени горячей жидкости может быть описан одним уравнением, в котором в зависимости от типа огнетушащего состава изменяются только толщина тушащего слоя и удельная скорость потерь ОТВ.

В качестве примера рассмотрим решение уравнения материального баланса для случая тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой.

Материальный баланс процесса тушения пламени углеводородов методом покрытия горячей поверхности слоем водяного пара может быть представлен уравнением

$$q dt = US dt + h dS, \quad (1)$$

где q — расход распыленной воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

t — время тушения, с;

U — удельная скорость потерь вещества, пропорциональная площади поверхности растекающегося слоя, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

S — площадь горения, м^2 ;

h — средняя толщина слоя водяного пара, м.

Толщина тушащего слоя водяного пара изменяется в зависимости от места падения струи на горящую поверхность. Чем выше интенсивность подачи распыленной струи, тем больше толщина слоя пара в месте ее падения. Причем по мере удаления от места падения струи толщина слоя пара уменьшается.

Уравнение сохранения массы воды предусматривает анализ потерь водяного пара, который выносятся вместе с продуктами горения, и выявление зависимости времени тушения и удельного расхода распыленной воды от интенсивности ее подачи.

Принимая во внимание, что толщина слоя водяного пара в месте падения распыленной струи зависит от интенсивности ее подачи J , предложили формулу для расчета средней толщины тушащего слоя водяного пара:

$$h = (h_0 + \beta J)/2, \quad (2)$$

где h_0 — минимальная толщина тушащего слоя водяного пара, м;

β — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность $\text{м} \cdot (\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}))^n$;

Коэффициент β определяется граничными условиями: $h = h_0$ при $J = J_{\text{кр}}$, поэтому

$$\beta = h_0/J_{\text{кр}}, \quad (3)$$

где $J_{\text{кр}}$ — критическая интенсивность подачи распыленного раствора, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

С учетом формулы (3) уравнение (1) может быть решено при начальных условиях $\tau = 0$; $S = 0$. Заменив отношения $q/S_0 = J$ получали формулу

$$\tau = -\frac{h_0}{2J_{\text{кр}}} \left(1 + \frac{J}{J_{\text{кр}}} \right) \ln \left(1 - \frac{J_{\text{кр}}}{J} \right). \quad (4)$$

Объемный расход водяного пара q_v рассчитывали по формуле

$$q_v = q_m \cdot 22,4/M_v, \quad (5)$$

где q_m — массовый расход водяной струи, $\text{кг}/\text{с}$;

M_v — молярная масса воды.

Удельный расход Q распыленной воды, затраченной на тушение пламени, рассчитывали умножением времени тушения на соответствующую интенсивность подачи:

$$Q = -\frac{h_0 J}{2J_{\text{кр}}} \left(1 + \frac{J}{J_{\text{кр}}} \right) \ln \left(1 - \frac{J_{\text{кр}}}{J} \right). \quad (6)$$

Анализ формулы (6) показывает, что зависимость удельного расхода распыленной воды от интенсивности ее подачи имеет минимум, который расположен в области оптимальной интенсивности подачи огнетушащего вещества. Наличие минимума на кривой расхода ОТВ экспериментально обнаружено для всех испытанных огнетушащих веществ.

Сопоставление результатов расчета по принятой модели с экспериментальными данными представлено на рис. 6.

Формулы (4) и (6) описывают зависимость времени и удельного расхода при тушении пламени от интенсивности подачи всех испытанных огнетушащих веществ — распыленной воды, огнетушащего порошка, хладона и пены низкой кратности.

При тушении порошком была выявлена роль степени дисперсности его частиц в этом процессе. Повышение дисперсности порошка от 100–110

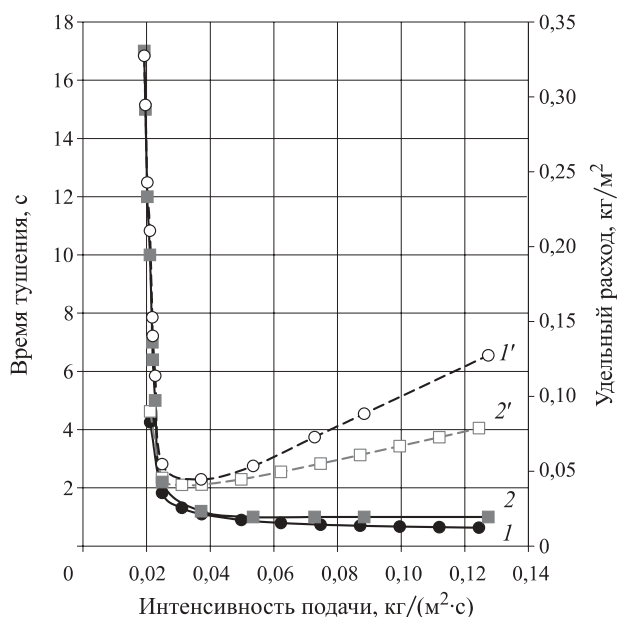


Рис. 6. Зависимости времени тушения дизельного топлива (1, 2) распыленной струей воды дисперсностью 20 мкм и ее удельного расхода (1', 2'), полученные экспериментально (1, 1') и расчетом (2, 2')

до 40–60 мкм позволило снизить его минимальный удельный расход с 2,3 до 0,7 $\text{кг}/\text{м}^2$, а оптимальную интенсивность — с 0,4 до 0,1 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Эти результаты показывают определяющую роль, которую играет дисперсность частиц порошка в процессе тушения.

Учитывая эффективность известного состава [5], в котором используется смесь карбамида с содой, были проведены опыты по тушению пламени бензина композицией карбамид – сода (1:1), приготовленной непосредственно перед испытанием, так как этот состав очень гигроскопичен. Результаты испытаний представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, на кривых зависимости удельного расхода от интенсивности наблюдается явно выраженный минимум.

Процесс тушения пламени горючей жидкости порошком аналогичен тушению распыленной водой. Вначале наблюдалось прекращение горения перед фронтом порошковой струи, а затем концентрированная взвесь порошка в воздухе стала растекаться слоем по горячей поверхности жидкости. В отличие от предсказанного расщепления частиц [5] под действием распадающихся от теплового потока молекул карбамида на CO_2 и аммиак частицы порошка не растрескивались и не распадались на более мелкие. Теплового потока, соприкасавшегося с фронтом распыленного порошка, явно не хватало на термическое разложение молекул карбамида. При использовании композиции порошка с карбамидом тушение также проходило по “локальному” механизму, при этом тепла от части факела было недостаточно

для фазовых превращений и тем более для разложения молекул мочевины.

Материальный баланс пены, поданной в резервуар на тушение пламени, позволяет получить расчетную формулу, аналогичную той, что используется при тушении распыленной водой:

$$\tau = -\frac{\rho_f h_s}{2J_{крf}} \left(1 + \frac{J}{J_{крf}}\right) \ln \left(1 - \frac{J_{крf}}{J}\right), \quad (7)$$

где ρ_f — плотность пены, кг/м³;

h_s — минимальная толщина слоя пены, которая определяется величиной сдвигового напряжения, м;

$J_{крf}$ — критическая интенсивность подачи пены, определяемая скоростью термического и контактного разрушения пены при растекании по горячей поверхности жидкости, кг/(м²·с).

В отличие от формулы (4) здесь учитывается специфика пены, которая заключается в том, что она является структурированной системой с предельным напряжением сдвига, упругостью и неньютоновской вязкостью [16–18]. Один из вариантов формулы (7) был предложен в работе [19].

Соответственно, для расчета удельного расхода пены Q_f получена формула, аналогичная (6):

$$Q_f = -\frac{\rho_f h_s}{2J_{крf}} \left(1 + \frac{J}{J_{крf}}\right) \ln \left(1 - \frac{J_{крf}}{J}\right). \quad (8)$$

На рис. 7 приведены результаты расчета по формулам (7) и (8) и экспериментальные данные по тушению гептана подачей пены на горящую поверхность и в слой горючего.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных проведено для двух способов тушения: подачи пены на горящую поверхность и подачи пены в слой горючей жидкости. Для “подслойного” тушения использовали пленкообразующий пенообразователь “Шторм Ф”, а для подачи пены на горящую поверхность — пенообразователь “Шторм М”. Сопоставление проводили по времени тушения и удельному расходу пенообразователя, использованного для тушения пламени, в расчете на единицу площади потушенной поверхности жидкости. С использованием формул (7) и (8) удастся удовлетворительно описать зависимости времени тушения и удельного расхода пенообразователя для обоих способов тушения пламени пеной низкой кратности. Результаты сопоставления расчетных данных с экспериментальными приведены на рис. 6 и 8. Заметное различие расчетных и экспериментальных данных наблюдается в области больших интенсивностей подачи пены. Это можно объяснить тем, что в рассмотренной модели процесса тушения не учитывается зависимость удельной скорости термического разруше-

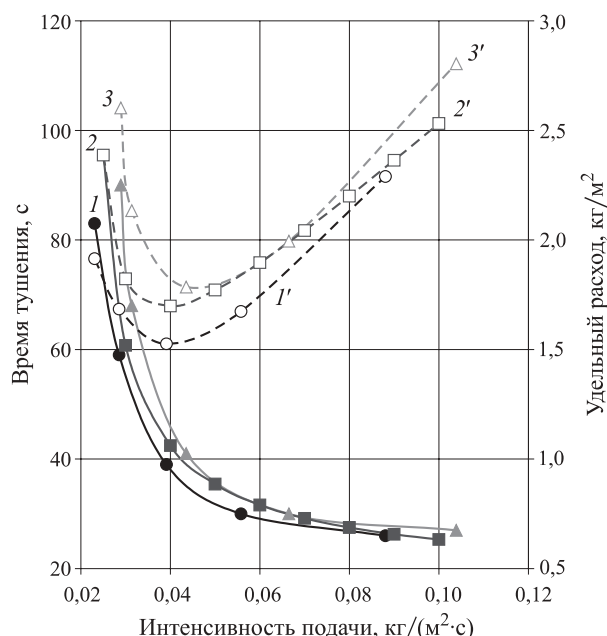


Рис. 7. Зависимости времени тушения гептана подачей пены на горящую поверхность (1–3) и удельного расхода пенообразователя “Шторм М” (1’–3’), полученные экспериментально (1, 1’) и расчетом по формулам (7) (2, 3) и (8) (2’, 3’)

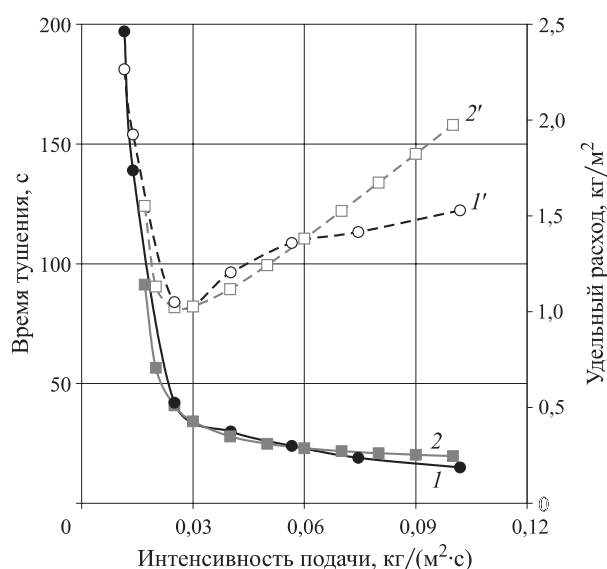


Рис. 8. Зависимости времени тушения гептана подачей пены в слой горючего (1, 2) и удельного расхода пенообразователя “Шторм Ф” (1’, 2’), полученные экспериментально (1, 1’) и расчетом по формулам (7) (2) и (8) (2’)

ния пены от степени покрытия ею горячей поверхности [15].

Выводы

Результаты комплексных экспериментальных исследований процесса тушения пламени углеводородов различными типами огнетушащих веществ, включая распыленную воду, огнетушащий порошок, химически активный фреон и пену низкой кратности

сти, позволили обосновать “локальный” механизм тушения пламени жидкостей огнетушащими веществами.

Результаты расчета времени тушения пламени горючих жидкостей и удельного расхода различных

типов огнетушащих веществ показали удовлетворительное совпадение расчетных данных с результатами эксперимента, что стало основанием для вывода о “локальном” механизме тушения пламени огнетушащими веществами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Диффузионное горение жидкостей. — М. : АН СССР, 1961. — 208 с.
2. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. Химико-физические процессы при горении и тушении. — М. : Стройиздат, 1975. — 240 с.
3. Абдурагимов И. М., Говоров В. И., Макаров Е. В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. — М. : ВИПТШ МВД РФ, 1988. — 255 с.
4. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Пожнаука, 2007. — 267 с.
5. Корольченко Д. А., Громоной В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 331–335.
6. Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А. Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 69–74.
7. Nash P. The essentials of dry powder and gaseous extinguishing systems // Fire Prev. — 1977. — No. 118. — P. 21–45.
8. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Тушение пламени огнетушащими порошками и аэрозольными составами // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 8. — С. 63–68.
9. Баратов А. Н., Иванов Е. Н. Пожаротушение на предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. — М. : Химия, 1971. — 416 с.
10. Абдурагимов И. М. Огнетушащие средства и способы их применения // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. — 1976. — Т. XXI, № 4. — С. 379–387.
11. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Анализ двойственного механизма тушения пламени // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 59–68.
12. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Универсальность механизмов тушения пламени различными огнетушащими веществами // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 11. — С. 84–88.
13. 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.
14. 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.
15. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М. : Изд. дом “Калан”, 2002. — 448 с.
16. Дерягин Б. В., Обухов Е. В. Упругие свойства пен и тонких пленок. II. Экспериментальная проверка теории // Журн. физ. химии. — 1936. — Т. 7, № 3. — С. 18–22.
17. Шароварников А. Ф., Шароварников С. А. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав. Свойства. Применение. — М. : Пожнаука, 2005. — 335 с.
18. Шароварников А. Ф., Кокорев Е. В. Исследование вязко-упругих свойств высокочастотных пен // Коллоидный журнал. — 1981. — Т. 43, № 2. — С. 178–183.
19. Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Изд. МКХ РСФСР, 1961. — 143 с.

Материал поступил в редакцию 26 октября 2015 г.

Для цитирования: Корольченко Д. А. Анализ процесса тушения пламени горючих жидкостей дисперсными огнетушащими веществами и пеной низкой кратности // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 51–58. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.51-58.

ANALYSIS OF THE PROCESS OF EXTINGUISHING OF A FLAME OF FLAMMABLE LIQUIDS BY DISPERSE EXTINGUISHING AGENTS AND LOW EXPANSION FOAM

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)

ABSTRACT

Ability of fire extinguishing agents to absorb half of the heat flow escaped while burning, that can lead to flame extinction, raises doubts in calculation of the thermal balance of a powder and, further, of sprayed water. It turned out that the balance of heat has a big advantage towards heat escaped during flame combustion. Amount of powder or sprayed water become insufficient to absorb half of the heat flow of flame. This work contains data and results of complex experimental and theoretical researches of the process of extinguishing of the flame of hydrocarbons by various types of fire extinguishing agents, including sprayed water, fire extinguishing powder, reactive freon and low expansion foam. On the basis of experimental researches of the process of extinguishing by means of streams of dispersed extinguishing agent and low expansion foam it is offered and substantiated the “local” mechanism of suppression of a flame of liquids by extinguishing agents. Existence of the minimum on curves of dependence of specific consumption on flow rate in the area of optimal flow rate of extinguishing agent is experimentally shown and theoretically substantiated. It is also offered two-stage mechanism of suppression. The first stage consists in interaction of the stream of extinguishing agent with part of a flame jet which is in contact with front of extinguishing agent. The flow of extinguishing agent interacts only with a small (local) area of the flame. Fire extinguishing agent allows not only to absorb half of the heat from flame jet in a local part, but also to cool it practically up to the temperature close to water boiling point. It leads to termination of burn directly on the front of movement of a fire extinguishing stream. Such “local” mechanism of interaction of sprayed water stream leads to evaporation of larger or smaller part of sprayed stream depending on its dispersion degree. The second stage of suppression process provides spreading of water vapor, as a layer of certain thickness, over the burning surface. The higher dispersion degree of sprayed water, the larger volume of water vapor and higher it’s covering rate of burning surface. Such extinguishing mechanism is also implemented in case of application of sprayed freon, sprayed powder, solid aerosol and low expansion foam. Standard equations for calculation of time and specific consumption of different types of extinguishing agents during suppression of flammable liquids are proposed. Satisfactory congruence of experimental results with data obtained by calculation using formulas which correspond to the “local” mechanism of suppression of a flame by fire extinguishing substances is shown.

Keywords: extinguishing agents; sprayed water; extinguishing powder; reactive freon; low expansion foam; flame extinguishing mechanism.

REFERENCES

1. Blinov V. I., Khudyakov G. N. *Diffuzionnoye gorenije zhidkostey* [Diffusion burning of liquids]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 1961. 208 p.
2. Shrayber G., Porst P. *Ognetushashchiye sredstva. Khimiko-fizicheskiye protsessy pri gorenii i tushenii* [Extinguishing media. Chemical-physical processes in combustion and extinguishing]. Moscow, Stroyizdat, 1975. 240 p.
3. 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, 1988. 255 p.
4. Gorshkov V. I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing of combustible liquids’ flame]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 267 p.
5. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. *Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysoknykh zdaniyakh* [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 331–335.

6. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Vliyaniye dispersnosti kapel vody na effektivnost tusheniya pozharov goryuchey zhidkosti [Impact of dispersion of water drops on the efficiency of fire extinguishing of combustible liquid]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 69–74.
7. Nash P. The essentials of dry powder and gaseous extinguishing systems. *Fire Prev.*, 1977, no. 118, pp. 21–45.
8. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Tusheniye plameni ognetushashchimi poroshkami i aerolnymi sostavami [Extinguishing of a flame by dry chemical powders and aerosol compositions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 63–68.
9. Baratov A. N., Ivanov E. N. *Pozharotusheniye na predpriyatiyakh khimicheskoy, neftekhimicheskoy i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti* [Fire extinguishing at the enterprises of chemical, petrochemical and oil-processing industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 416 p.
10. Abduragimov I. M. Ognetushashchiye sredstva i sposoby ikh primeneniya [Fire extinguishing means and ways of their application]. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva — Magazine of All-Union Chemical Society named after D. I. Mendeleev*, 1976, vol. XXI, no. 4, pp. 379–387.
11. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Analiz dvoystvennogo mekhanizma tusheniya plameni [Analysis of the dual fire suppression mechanism]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 12, pp. 59–68.
12. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Universalnost mekhanizmov tusheniya plameni razlichnymi ognetushashchimi veshchestvami [Universality of mechanisms of fire suppression by various extinguishing agents]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 11, pp. 84–88.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Deryagin B. V., Obukhov E. V. Uprugkiye svoystva pen i tonkikh plenok. II. Eksperimentalnaya proverka teorii [Elastic properties of foams and thin films. II. Experimental verification of the theory]. *Zhurnal fizicheskoy khimii — Russian Journal of Physical Chemistry*, 1936, vol. 7, no. 3, pp. 18–22.
17. Sharovarnikov A. F., Sharovarnikov S. A. Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav, svoystva, primeneniye [Foam concentrates and fire extinguishing foams. Structure, properties, application]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005. 335 p.
18. Sharovarnikov A. F., Kokorev Ye. V. Issledovaniye vyazko-uprugikh svoystv vysokokratnykh pen [Research of visco-elastic properties of high expansion foams]. *Kolloidnyy zhurnal — Colloid Journal*, 1981, vol. 43, no. 2, pp. 178–183.
19. Petrov I. I., Reutt V. Ch. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Suppression of combustible liquids flame]. Moscow, Ministry of Utilities Sector Publ., 1961. 143 p.

For citation: Korolchenko D. A. Analiz protsessa tusheniya plameni goryuchikh zhidkostey dispersnymi ognetushashchimi veshchestvami i penoy nizkoy kratnosti [Analysis of the process of extinguishing of a flame of flammable liquids by disperse extinguishing agents and low expansion foam]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 51–58. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.51-58.