

ТУШЕНИЕ ПОЖАРОВ С ПОМОЩЬЮ АЭРОЗОЛЕЙ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ

О. П. Коробейничев, А. Г. Шмаков, А. А. Чернов, Т. А. Большова,
В. М. Шварцберг, К. П. Куценогий, В. И. Макаров

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, korobein@kinetics.nsc.ru

Приведены результаты проверки лабораторных экспериментов крупномасштабными натурными испытаниями по тушению двух типов модельных очагов пожаров с помощью аэрозолей растворов солей. Эксперименты показали, что кратковременное воздействие аэрозольного облака водного раствора красной кровяной соли $K_3[Fe(CN)_6]$ на фронт пламени низового лесного пожара приводит к подавлению газофазного горения, а в случае модельного очага пожара класса А (горящая древесина) — к его полному гашению. Минимальная гасящая массовая концентрация $K_3[Fe(CN)_6]$, составляющая 4.5 г/м^3 , в этих сериях опытов близка к измеренной ранее в лабораторных экспериментах. Установлено, что при тушении пожара с помощью аэрозоля водного раствора $K_3[Fe(CN)_6]$ объемный расход такого пламегасителя в 30 раз меньше нормативного расхода чистой воды при тушении из брандспойта.

Ключевые слова: пожаротушение, аэрозоли, пламегасители, ингибиторы, металлсодержащие соединения.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и исследование новых эффективных и экологически безопасных пламегасителей — одна из приоритетных задач в области пожаротушения. В настоящее время известны различные методы тушения пожаров с помощью распыления воды [1–15]. Основным действующим фактором при таком способе тушения является понижение температуры в зоне горения при испарении диспергированной воды. Известно, что эффективность использования водогазового облака зависит от типа пожара и дисперсности водяных капель. В описанных методах спектр размеров капель воды достаточно постоянен и широк, основное количество воды находится в каплях крупнее 100 мкм. Поэтому к недостатку этого метода следует отнести большой расход воды на единицу объема пламени.

Повышение эффективности тушения с помощью воды может быть достигнуто как за счет улучшения диспергирования воды, так и за счет введения в нее различных добавок [16]. В последнее время проведен ряд исследований, целью которых являлось определение эффективности гашения аэрозолями водных растворов [17–28]. В качестве добавок были исследованы такие соединения, как $NaCl$, KCl , LiI , CH_3COOK , $CoCl_2$, $NiCl_2$, $NaOH$, $NaHCO_3$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $MnCl_2$, $FeCl_2$ и др. Установле-

но, что некоторые из соединений являются более эффективными ингибиторами горения, чем такие фреоны, как CF_3Br . Поэтому их рассматривают как перспективные добавки к воде для увеличения эффективности гашения пламени. Как показали результаты лабораторных экспериментов, наиболее эффективными (в расчете на массу) пламегасителями являются комплексные соединения калия и железа [29]. Однако эффективность пламегасителей, определенная в лабораторных экспериментах, не всегда соответствует эффективности при тушении крупномасштабных очагов пожаров. Поэтому только проведение натуральных испытаний по гашению пламен различного типа позволяет сделать корректные (достоверные) выводы о перспективности новых пламегасителей и предлагаемого в данной работе способа их доставки к очагу пожара в виде мелкодисперсного аэрозоля.

Целью настоящей работы является сопоставление эффективности традиционно используемого пламегасителя — воды и нового — водного раствора соли калия путем проведения сравнительных натуральных испытаний в полевых условиях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Полевые испытания по тушению различных видов пламени с помощью мобильного генератора аэрозолей регулируемой дисперсно-

сти (ГРД) проводились для двух вариантов очагов пожара: а) модельный очаг низового лесного пожара; б) модельный очаг пожара класса 0.5А (горящая древесина). Для каждого варианта было проведено две серии экспериментов: 1) с использованием воды без добавок; 2) с использованием водного раствора ингибитора.

Для полевых испытаний использовался аэрозольный генератор [30], смонтированный на шасси автомобиля. Аэрозольный генератор включает в себя источник сжатого воздуха, емкости для топлива газотурбинного двигателя и водных растворов ингибиторов, систему подачи топлива и рабочих жидкостей. Аэрозольный генератор снабжен термомеханическим и пневматическим технологическим контуром, позволяющим регулировать дисперсность аэрозоля в широком диапазоне. Контур включает источник сжатого воздуха, форсунки со сменными соплами для воздуха и жидкости, систему измерения и регулирования расхода диспергируемых жидкостей. Для облегчения конструкции в качестве единого источника сжатого воздуха использована вспомогательная силовая самолетная установка ТА-6А.

Параметры генератора с пневматическим контуром следующие: рабочее тело — воздух в смеси с водой или раствором, скорость струи у сопла — 330 м/с, скорость струи на расстоянии 6 м от сопла — до 20 м/с, диаметр струи на расстоянии 6 м от сопла — около 1.2 м, объемный расход воздуха — 0.8 кг/с, максимальный расход раствора или воды — 20 л/мин, медианно-массовый диаметр частиц аэрозоля — 20 мкм [31].

Модельный очаг низового лесного пожара представлял собой горизонтальный травянистый участок размером 3 × 4 м, отделенный от окружающей территории противопожарной полосой шириной 1 м. Масса горючих материалов (сухая трава, мелкие ветки деревьев диаметром до 2 см) составляла 2 кг/м², их влажность соответствовала естественным условиям. Скорость ветра не превышала 2 м/с, температура воздуха +14 °С. Горизонтальная скорость распространения пламени около 25 см/мин.

Модельный очаг пожара класса 0.5А соответствовал ГОСТ 27586-88. Он представлял собой деревянный штабель кубической формы, состоящий из 45 брусков квадратного сечения 40 × 40 мм и длиной 40 см. Брусочки в штабеле расположены так, что в каждом слое расстояние между брусками составляет 40 мм, брусочки

следующего слоя расположены перпендикулярно предыдущему. Материал брусков — древесина хвойных пород, не хуже 3-го сорта, влажность 12 ÷ 14 %. Брусочки, образующие наружные грани штабеля, были скреплены для прочности скобами и гвоздями. Для зажигания очага использовался металлический поддон размером 300 × 300 × 100 мм, размещенный под штабелем на расстоянии 0.5 м от его нижних брусков. В поддон было залито 3 л воды и 0.6 л бензина А-76 (ГОСТ 2084). Тушение очага производилось через 7 мин после поджигания бензина в поддоне, поддон во время тушения не убирался, очаг равномерно поворачивали вокруг его вертикальной оси со скоростью 10 об/мин. Испытания проводились на открытой местности при скорости ветра 0 ÷ 3 м/с и температуре воздуха +18 °С. Расстояние между ГРД и очагом составляло 6 м, диаметр струи аэрозоля не менее 1.2 м. Согласно правилам испытаний средств пожаротушения [32] испытание в целом считается успешным, если гашение достигается не менее чем в двух из трех попыток, время подачи пламегасителя не более 180 с и в течение 10 мин после прекращения его подачи не происходит повторного возгорания.

Для определения характеристик аэрозольного облака, образованного из термомеханического контура, в момент тушения низового лесного пожара в режиме реального времени проводили: а) измерение размера аэрозольных частиц и их массовой концентрации с помощью нефелометра [33]; б) измерение температуры пламени с помощью цифрового тепловизора; в) цифровую видеосъемку для получения с помощью цифровой стереофотограмметрии и ГИС-технологий трехмерных компьютерных моделей пространственно-временной изменчивости формы аэрозольного облака и пламени наземного лесного пожара.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в качестве пламегасителей были изучены методом чашечной горелки некоторые неорганические и органические соли калия (K_3PO_4 , $KOONH_3$, $KOOSCOOK$ и $K_4[Fe(CN)_6]$) [29]. Результаты экспериментов по гашению диффузионного пламени *n*-гептан/воздух с помощью водных растворов этих солей показали, что наиболее эффективными пламегасителями являются $K_4[Fe(CN)_6]$ (желтая кровяная соль) и $K_3[Fe(CN)_6]$ (красная кровяная соль). Минимальная массовая га-

сящая концентрация $K_4[Fe(CN)_6]$ составляет 6.6 г/м^3 [29]. Используемые соли имеют сходные химические свойства, а также содержат относительно большое (3–4 атома) количество калия в их молекулах и поэтому обладают близкой эффективностью как пламегасители. Для испытаний по гашению двух типов модельных очагов пожаров в полевых условиях был выбран $K_3[Fe(CN)_6]$, так как его растворимость в воде выше, чем у $K_4[Fe(CN)_6]$.

А. На пламя очага модельного лесного пожара воздействовали аэрозольным облаком, создаваемым ГРД. Расход жидкости 0.330 л/с , продолжительность подачи аэрозоля в очаг пожара около 4 с. В экспериментах первой серии (с чистой водой) после воздействия аэрозольного облака на пламя горение продолжалось без видимых изменений. Таким образом, было установлено, что аэрозоль воды без добавок не приводит к затуханию пламени. Во второй серии экспериментов на пламя воздействовали облаком аэрозоля 30%-го водного раствора $K_3[Fe(CN)_6]$. Массовая концентрация $K_3[Fe(CN)_6]$ в расчете на сухое вещество в зоне пламени составляла около 4.5 г/м^3 , что близко к минимальной гасящей концентрации $K_4[Fe(CN)_6]$, определенной в лабораторных экспериментах [29]. Измерения температуры пламени с помощью тепловизора показали, что при попадании пламегасителя в пламя его максимальная температура уменьшалась с 1000 до $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, можно сделать вывод, что в момент прохождения аэрозольного облака через зону горения пламя затухает. Однако через некоторое время после прекращения подачи пламегасителя горение возобновлялось. Это связано с тем, что за время подачи пламегасителя ($\approx 4 \text{ с}$) коксовые остатки (угли) не успевают погаснуть и достаточно охладиться. Следовательно, для полного гашения модельного очага низового лесного пожара необходимо увеличивать время подачи пламегасителя настолько, чтобы температура в зоне горения опустилась ниже температуры самовоспламенения лесных горючих материалов. Очаг лесного пожара, содержащий различные по строению и составу горючие материалы: сухая трава, мелкие и крупные ветки, коксовый остаток, является достаточно сложным объектом для исследования эффективности пламегасителей с точки зрения воспроизводимости результатов. Поэтому для оценки минимальной продолжительности подачи пламегасителя было реше-

но провести исследования с более стандартизованным очагом пламени, который используется при испытаниях огнетушителей и позволяет получить воспроизводимые и достоверные результаты.

Б. На пламя модельного очага пожара класса 0.5А воздействовали потоком воздуха, содержащим аэрозоль воды или 30%-го водного раствора $K_3[Fe(CN)_6]$. Согласно нормативным техническим требованиям [16] интенсивность подачи чистой воды при тушении древесины в штабелях влажностью $8 \div 14 \%$ обычным способом (из брандспойта) должна составлять $0.45 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ при времени тушения 180 с. Поскольку в литературе практически отсутствуют точные количественные данные об эффективности тушения очага пожара класса 0.5А с помощью различных средств пожаротушения, авторы приняли эффективность тушения (общий расход воды) из брандспойта равной единице. Это позволяет в дальнейшем оценивать эффективность изучаемых способов тушения относительно эффективности тушения водой из брандспойта и таким образом сравнивать между собой эффективность исследуемых способов.

Общая площадь горения данного модельного очага пожара с хорошо развитой поверхностью составляет 2.37 м^2 . По геометрическим параметрам общий объем очага класса 0.5А составляет 0.058 м^3 , половину которого занимает древесина. Таким образом, согласно нормативам для тушения данного очага необходимо 192 л воды, что превышает объем свободного внутреннего пространства очага почти в 7 раз. Очевидно, данный факт связан с тем, что при тушении таких объектов, как штабели древесины, возникают очень существенные потери воды из-за плохой смачиваемости и стекания с горячей поверхности. При тушении из брандспойта крупные капли воды воздействуют только на верхнюю (и частично на боковую) горящую поверхность очага. Поэтому логично ожидать, что тушение пожара с помощью мелкодисперсного аэрозоля позволит существенно снизить расход воды, так как он воздействует на горящие поверхности независимо от их пространственной ориентации.

При гашении с помощью ГРД только небольшая часть пламегасителя поступает в зону горения, остальная уносится мимо газовым потоком. Можно считать, что пламегаситель с потоком газов поступает в модельный

очаг через его фронтальную поверхность и распределяется внутри него по свободному пространству между деревянными брусками. Исходя из соотношения площади фронтальной поверхности модельного очага (0.144 м^2) и сечения аэрозольной струи ГРД (1.13 м^2) можно оценить долю поступающего в зону горения пламегасителя, она составляет 0.127 . Таким образом, при общем расходе жидкости из ГРД 0.33 л/с непосредственно в очаг поступает $0.33 \times 0.127 = 0.042 \text{ л/с}$.

Эксперименты с аэрозолем чистой воды показали, что при таком расходе жидкости погасить модельный очаг с помощью ГРД за время $\approx 170 \text{ с}$ практически невозможно. Гашение происходит при подаче жидкости в течение $\approx 280 \text{ с}$. При этом степень выгорания горючего материала составляет не менее 80% . Таким образом, для гашения модельного очага с помощью аэрозоля воды необходимо затратить не менее 11.8 л жидкости, что в ≈ 16 раз меньше нормативного расхода чистой воды при тушении стандартным способом из брандспойта.

Эксперименты с 30% -м водным раствором $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, подаваемым в виде аэрозоля, показали более высокую эффективность гашения по сравнению с аэрозолем чистой воды. После начала тушения видимое пламя исчезает через $76 \pm 6 \text{ с}$. При времени подачи пламегасителя $154 \pm 4 \text{ с}$ происходило уверенное гашение модельного очага без его повторного возгорания в течение 10 мин после прекращения тушения. Этот интервал времени регламентирован в методике испытаний огнетушителей [32]. При меньших временах тушения, как правило, происходит повторное самовозгорание. Расход раствора $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ (поступающего непосредственно в модельный очаг пожара) составлял 0.042 л/с , что при подаче пламегасителя в течение 154 с соответствует общему расходу раствора 6.5 л . Массовая концентрация $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ в расчете на сухое вещество в зоне пламени $\approx 4.5 \text{ г/м}^3$, что близко к минимальной гасящей концентрации $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, составляющей 6.6 г/м^3 [29]. Визуальное исследование горючего материала после тушения показало, что все остатки материала покрыты $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. В середине модельного очага наблюдается большее выгорание, чем с внешней стороны. Степень выгорания деревянных брусков составляет $\approx 50 \%$.

Таким образом, результаты испытаний продемонстрировали высокую эффективность

тушения модельного очага пожара класса 0.5А с помощью аэрозоля 30% -го водного раствора $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. При концентрации $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ в пересчете на сухое вещество $\approx 4.5 \text{ г/м}^3$ время подачи пламегасителя должно составлять не менее 154 с . При этом установлено, что расход водного раствора $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ в ≈ 1.9 раза меньше по сравнению с расходом чистой воды при тушении аэрозолем и в ≈ 30 раз меньше нормативного расхода чистой воды при тушении из брандспойта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены полевые эксперименты по гашению модельных очагов низового лесного пожара и пожара класса 0.5А (горящая древесина) с помощью аэрозоля водного раствора соли калия. Результаты проведенных экспериментов подтвердили, что с помощью предложенных пламегасителей можно эффективно подавлять как пламенное, так и тлеющее горение. Предлагаемый способ тушения с помощью мелкодисперсных аэрозолей растворов солей калия позволяет в 30 раз сократить расход тушащей жидкости по сравнению с тушением чистой водой из брандспойта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алеханов Ю. В., Левушов А. Е., Логвинов А. А., Локтев А. А., Мешков Е. Е. О способе получения диспергированной жидкости с газом при помощи поршневой машины и его возможных применениях // III науч.-техн. конф. «Научно-инновационное сотрудничество»: сб. науч. тр. — М., 2004. — Ч. 1. — С. 169–170.
2. Корольченко А. Я. Технология импульсного водяного пожаротушения IFEX 3000 // Пожаровзрывоопасность. — 2000. — № 2. — С. 3–5.
3. Мешков Е. Е., Невмержицкий Н. В. Способ получения смеси диспергированной жидкости с газом // Пат. РФ №2220009. Заявка № 2001123009. Оpubл. 27.06.03, БИПМ № 18.4.1.
4. Терпигорьев В. С., Соколов Ю. И., Щербаков О. П. Способ пожаротушения газожидкостной смесью и газожидкостная форсунка для его осуществления // Пат. РФ № 2074544, опубл. 27.02.1997.
5. Сундхольдм Г. Способ пожаротушения и установка для осуществления этого способа // Пат. РФ № 2126282, опубл. 20.02.1999.
6. Терпигорьев В. С., Щербаков О. П., Малинов В. М. Установка для тушения пожара // Пат. РФ № 2193908, опубл. 20.03.2001.

7. Алексеев Ю. С., Донец В. В., Заволока А. Н., Кравчуковский В. Ф., Кремена А. П., Нода А. А., Свириденко Н. Ф., Сербин В. В. Устройство для получения струи жидкости с управляемой дисперсностью капель // Пат. РФ № 2209124, опублик. 27.07.2001.
8. Зуев Ю. В., Карпышев А. В., Лепешинский И. А. Способ пожаротушения с использованием летательного аппарата и устройство для его осуществления // Пат. РФ № 2131379, опублик. 10.06.1999.
9. Зуев Ю. В., Карпышев А. В., Лепешинский И. А. Способ создания газокапельной струи, установка для ее осуществления и сопло для создания газокапельной струи // Пат. РФ 2107554, опублик. БИ, 1998.
10. Алеханов Ю. В., Близнецов М. В., Власов Ю. А., Дудин В. И., Левушов А. Е., Логвинов А. И., Ломтев С. А., Мешков Е. Е. Взаимодействие диспергированной воды с пламенем // Письма в ЖТФ. — 2003. — Т. 29, № 6. — С. 1–6.
11. Пожарная техника. Ч. 2: Пожарные автомобили. — М.: Стройиздат, 1988. — С. 100–105.
12. Вопросы лесной пирологии / под ред. Н. П. Курбатского. — Красноярск: Институт леса и древесины им. В. Н. Сукачева, 1970. — С. 340–353.
13. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. — Новосибирск: Наука, 1977. — С. 206–237.
14. Жихарев С. С., Пискунов В. Н., Цыкин С. В., Мешков Е. Е., Затевахин М. А., Цариченко С. Г. Моделирование и оптимизация способов тушения пожара диспергированной водой // Аэрозоли и безопасность: междунар. науч.-практич. конф. — Обнинск, 2005. — С. 71–72.
15. Цыкин С. В. Способ тушения пожара с помощью капсул с водой // Там же. — С. 194–196.
16. Баратов А. Н. Горение — пожар — взрыв — безопасность. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003.
17. Mawhinney J. R. Design of water mist fire suppression systems for shipboard enclosures // Proc. of the Intern. Conf. on Water Mist Fire Suppression Systems, November 4–5 1993. — Boras, Sweden, 1993. — P. 16–44.
18. Moore T. A., Weitz C., McCormick S., Clauson M. Laboratory optimization and medium scale screening of iodide salts and water mixtures // Proc. of Halon Option Technical Working Conf. — Albuquerque, NM, 1996. — P. 477–498.
19. Shilling H., Dlugogorski B. Z., Kennedy E. M., Leonardi E. Extinction of diffusion flames by ultra fine water mist doped with metal chlorides // Proc. of the Sixth Australasian Heat and Mass Transfer Conf. — New York: Begell House, 1996. — P. 275–282.
20. Zheng R., Rogg B., Bray K. N. Effect of sprays of water and nacl-water solutions on the extinction of laminar premixed methane-air counter-flow flames // Combust. Sci. Technol. — 1997. — V. 126. — P. 389–401.
21. Lazzarini A. K., Krauss R. H., Chelliah H. K., Linteris G. T. Extinction conditions of non-premixed flames with fine droplets of water and water/NaOH solutions // Proc. Combust. Inst. — 2000. — V. 28. — P. 2939–2945.
22. Mesli B., Gokalp I. Extinction limits of opposed jet turbulent premixed methane air flames with sprays of water and NaCl-water solution // Combust. Sci. Technol. — 2000. — V. 153. — P. 193–211.
23. McDonnell D., Dlugogorski B. Z., Kennedy E. M. Evaluation of transition metals for practical fire suppression systems // Proc. of Halon Option Technical Working Conf. — Albuquerque, NM, 2002. — P. 117–124.
24. Hirst R., Booth K. Measurement of flame extinguishing concentrations // Fire Technol. — 1977. — V. 13. — P. 296–315.
25. Hamins A., Gmurczyk G., Grosshandler W., Rehwoldt R. G., Vazquez I., Cleary T. Evaluation of alternative in-flight fire suppressants for full-scale testing in simulated aircraft engine nacelles and dry bays // Proc. of Halon Option Technical Working Conf. — Albuquerque, NM, 1994. — P. 345–465.
26. Hamins A. Flame extinction by sodium bicarbonate powder in a cup burner // Proc. Combust. Inst. — 1998. — V. 27. — P. 2857–2864.
27. Linteris G. T., Katta V. R., Takahashi F. Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames // Combust. Flame. — 2004. — V. 138, N 1–2. — P. 78–96.
28. Liu J., Cong B., Liao G. Experimental study on CH₄/air fire suppression effectiveness of water mist with metal chloride additives // Book of Abstr. of 32th Intern. Symp. on Combustion, August 3–8 2008. — McGill University, Montreal, Canada, 1F03.
29. Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Шварцберг В. М., Якимов С. А., Князьков Д. А., Комаров В. Ф., Сакович Г. В. Исследование фосфорорганических, фторорганических, металлсодержащих соединений и твердотопливных газогенераторных составов с добавками фосфорсодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 6. — С. 64–73.
30. Сахаров В. М., Куценогий К. П., Верховская Н. Н., Анкилов А. Н., Макаров В. И., Киров Е. И. Аэрозольный генератор // Пат. РФ № 950260 A01M7/00, опублик. 15.08.1982, бюл. № 30.

31. Сахаров В. М. Конструктивные и режимные характеристики аэрозольного генератора с регулируемой дисперсностью // Оптимизация технологии применения инсектицидных аэрозолей: сб. науч. тр. — Новосибирск: Изд-во СО ВАСХНИЛ, 1983. — С. 3–13.
32. ГОСТ Р 51057-2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования.
33. Бизин М. А., Куценогий П. К., Куценогий К. П., Макаров В. И. Автоматизация нефелометрических измерений массовой концентрации субмикронных атмосферных аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 29, № 3. — С. 291–296.

*Поступила в редакцию 5/III 2009 г.,
в окончательном варианте — 7/V 2009 г.*
