

Р. С. ВОЛКОВ, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

И. С. ВОЙТКОВ, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: i.voytkov@ges.tomsk.ru)

О. В. ВЫСОКОМОРНАЯ, канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь (постдок) кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: vysokomornaja@tpu.ru)

УДК 536.4

ОСОБЕННОСТИ ТУШЕНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ И ОРГАНИЧЕСКИХ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ РАСПЫЛЕННЫМ ПОТОКОМ ВОДЫ

Выполнена экспериментальная оценка условий ликвидации модельного очага пожара горючих жидкостей (нефти, бензина, керосина, этанола, ацетона) потоком распыленной воды. Выявлены предельные параметры тушащей жидкости и продуктов сгорания, а также характеристики распыления, при которых реализуются условия тушения модельного очага пожара в цилиндре высотой $h = 1,5$ м и диаметром $d = 0,15$ м. Получены зависимости характерных времен тушения t_e от скорости движения высокотемпературных (свыше 1000 К) продуктов сгорания органических жидкостей. Экспериментально исследовано влияние на параметр t_e начальной температуры тушащей жидкости T_w . Показано, что при дисперсности распыленного потока воды $R_m = 0,05 \div 0,20$ мм нагрев до $T_w = 325$ К приводит к росту характерных времен t_e практически в 10 раз. Результаты исследований могут быть использованы при разработке новых подходов к тушению жидких топлив и органических горючих жидкостей распыленным потоком воды.

Ключевые слова: жидкое топливо; органическая горючая жидкость; пламя; распыленный поток воды; тушение.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.68-75

Введение

Технологические циклы предприятий нефтедобычи и нефтепереработки характеризуются наивысшими категориями пожароопасности ввиду низких порогов взрываемости и воспламеняемости используемых в производстве сырья и продуктов переработки [1–6]. Обычно даже при условии быстрой локализации и ликвидации подобных возгораний ущерб от пожара бывает значительным [5]. В настоящее время стандартным методом тушения возгораний нефти и нефтепродуктов считается применение пенообразователей (пенная атака) совместно с охлаждением горящего и соседних резервуаров [1–3]. Использование в качестве тушащего состава пены различной кратности хорошо зарекомендовало себя при ликвидации пожаров на предприятиях добычи, транспортирования, хранения и переработки нефти. Однако на сегодняшний день главным недостатком такой технологии по-прежнему является ее стоимость.

В качестве альтернативного способа ликвидации возгораний нефти и нефтепродуктов может быть рассмотрена технология полидисперсного пожаротушения распыленной водой, а также жидкостными составами на ее основе (солевыми растворами, эмульсиями и суспензиями). В работах [7–10] представлены результаты экспериментальных исследований особенностей испарения капельных потоков различных жидкостных составов в продуктах сгорания жидких топлив и органических горючих жидкостей. Установленные в [7–10] характеристики тепломассопереноса и фазового перехода позволяют сделать заключение о высокой интенсивности образования водяных паров в области высокотемпературных (свыше 1000 К) продуктов сгорания, что, в свою очередь, свидетельствует о возможности ликвидации очага пожара путем уменьшения концентрации паров горючей жидкости в газовой фазе и охлаждения жидкой фазы для снижения интенсивности испарения горючего вещества. В связи с этим

представляет интерес оценка времен тушения пламен типичных горючих жидкостей капельным потоком воды с контролируемыми параметрами распыла, а также количественных показателей расхода тушащей среды при варьировании характеристик распыления, параметров тушащей жидкости и высокотемпературных продуктов сгорания.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение основных характеристик тушения пламен жидких топлив и органических горючих жидкостей распыленным потоком воды.

Экспериментальный стенд и методы исследования

При проведении исследований использован экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 1. По своим основным элементам применяемый стенд аналогичен описанному в работе [9].

Исследования проводились с использованием панорамных оптических методов визуализации и диагностики гетерогенных потоков Particle Image Velocimetry (PIV), Particle Tracking Velocimetry (PTV) [11], Stereoscopic Particle Image Velocimetry (Stereo PIV) [12] и Shadow Photography (SP) [13]. Для реализации указанных методов применялся кросскорреляционный комплекс в составе синхронизирующего процессора 17 (максимальная дискретизация сигналов 10 нс), двух кросскорреляционных CCD-

видеокамер IMPERX IGV B2020M 3 и 4 (формат изображения 2048×2048 пикселей, кадровая частота 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя последовательными кадрами 5 мкс) и системы иллюминации на базе импульсного лазера Nd:YAG 18 (длина волны 532 нм, минимальная энергия в импульсе 70 мДж, максимальная длительность импульса 12 нс, частота повторений 15 Гц). Для видеофиксации стадий исследуемого процесса использовались две высокоскоростные CMOS-видеокамеры “Phantom V411” и “Phantom MIRO M310” 1 и 2 (формат изображения 1280×1280 пикселей, максимальная частота съемки $6 \cdot 10^5$ кадров в секунду).

Для определения скоростей движения высокотемпературного газового (U_g) и капельного (U_d) потоков применялись методики на базе методов “трассерной” визуализации PIV, PTV и Stereo PIV [11–13]. Метод PIV использовался для построения осредненных регулярных двухкомпонентных полей скоростей потоков, метод Stereo PIV — для определения осредненных регулярных трехкомпонентных полей скоростей. С помощью метода PTV осуществлялось слежение за каждой отдельной каплей в пароводяном потоке и построение нерегулярных двумерных распределений скоростей. Для определения размеров капель воды R_d в полидисперсном капельном потоке применялся метод теневой макросъемки SP [13].

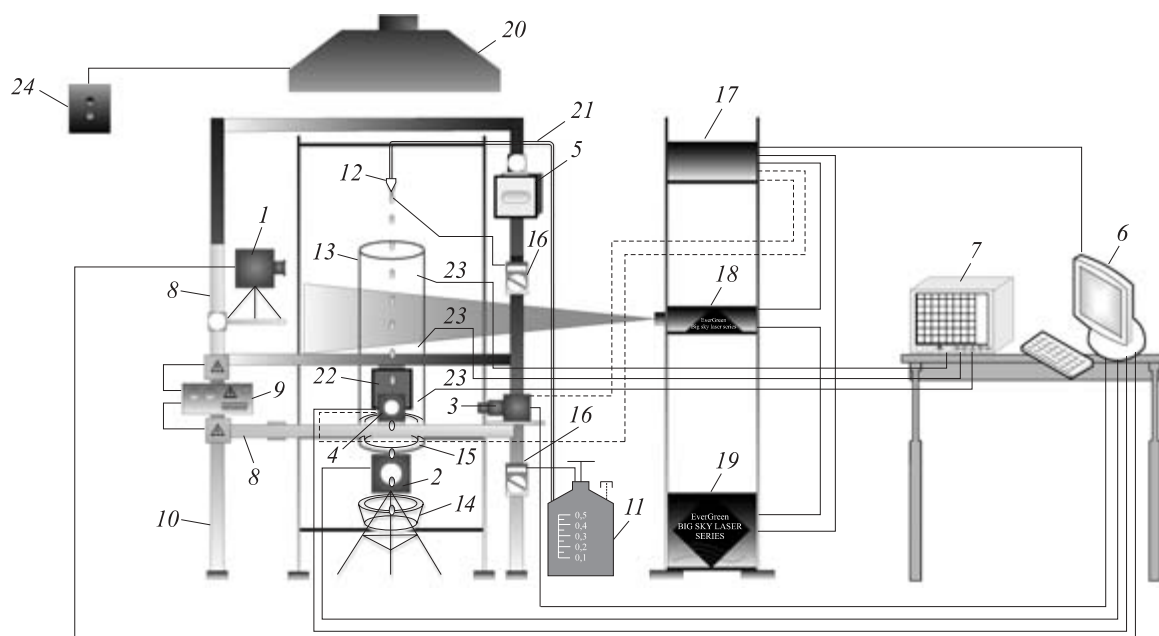


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1, 2 — высокоскоростные видеокамеры; 3, 4 — кросскорреляционные видеокамеры; 5 — осветительный прожектор; 6 — персональный компьютер (ПК); 7 — регистратор многоканальный технологический (PMT); 8 — моторизованное координатное устройство (МКУ); 9 — блок питания МКУ; 10 — алюминиевая стойка; 11 — емкость с водой; 12 — дозирующее/распылительное устройство; 13 — цилиндр из кварцевого стекла; 14 — уловитель капель; 15 — полый цилиндр с горючей жидкостью (горелка); 16 — цифровой мультиметр; 17 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 18 — двойной твердотельный импульсный лазер; 19 — генератор лазерного излучения; 20 — нагнетательная система; 21 — канал подачи воды; 22 — диффузный экран в комплекте со световодом; 23 — термпары; 24 — пульт включения/отключения нагнетательной системы

В зависимости от типа эксперимента (и реализуемого метода измерений) выбиралась высота установки CCD-камер 3 и 4 и лазера 18. В случае измерений методами PIV и PTV высота установки камер и лазера выбиралась таким образом, чтобы оптическая ось камер и плоскость светового ножа лазера 18 пересекались под углом 90° в регистрационной области. В случае выполнения измерений методом Stereo PIV угол между оптическими осями камер 3 и 4 и плоскостью светового ножа лазера 18 составлял $30\text{--}60^\circ$. При использовании метода SP напротив камеры за капельным потоком устанавливался стробоскопический источник света — специальный диффузный экран 22, соединенный посредством световода с лазером 18. Синхронизирующим процессором 17 инициировалась работа кросскорреляционного комплекса и специализированного программного обеспечения, позволяющего визуализировать и проводить обработку полученных по результатам экспериментов видеок кадров с перемещающимся потоком капель.

Все эксперименты осуществлялись в два этапа: на первом проводилась оценка характерных времен прогорания жидких горючих веществ t_b при отсутствии тушения; на втором — характерных времен тушения t_e используемых горючих веществ. Оценка времен выполнялась путем анализа видеозаписей с высокоскоростных CMOS-видеокамер 1 и 2.

В качестве модельного очага использовался цилиндр из жаропрочного кварцевого стекла 13 (высотой 1 м, диаметром 0,15 м). В нижней части цилиндра располагалась горелка 15, во внутреннюю полость которой заливалось 250 мл горючей жидкости, после чего инициировалось ее зажигание. Для установления режима стационарного горения использовалась нагнетательная система 20, обеспечивающая постоянство скоростей продуктов сгорания в канале 13. Для равномерного прогрева цилиндра 13 после зажигания жидкости выдерживался временной интервал 150–200 с. По истечении этого времени включался распылитель 12, соединенный патрубком с емкостью 11 (предварительно заполненной водой) и настроенный в соответствии с требуемыми параметрами распыла. При этом осуществлялся вдув полидисперсного капельного потока во внутреннюю полость цилиндра 13 и видеофиксация процесса тушения видеокамерами 1–4.

В качестве горючих жидкостей в экспериментах использовались: автомобильный бензин с октановым числом 92, авиационный керосин ТС-1, технический ацетон (диметилкетон по ГОСТ 2768–84), технический спирт (этиловый синтетический по ГОСТ Р 52574–2006), а также легкая нефть плотностью $\rho \approx 667 \text{ кг/м}^3$ (Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение, разведочная скважина 75). Темпера-

тура пламени и продуктов сгорания T_g в канале 13 контролировалась по всей его высоте вдоль оси симметрии по аналогии с экспериментами [14, 15] с применением вольфрамрений-вольфрамрениевых термодпар (диапазон измеряемых температур $0\text{--}2473 \text{ К}$, предел допускаемой погрешности $\pm 0,005 |T_g|$). Измерение начальной температуры тушащего состава (воды) T_w в экспериментах проводилось в емкости 11 и на входе распылителя 12 с помощью двух хромель-копелевых термодпар (диапазон измеряемых температур $273\text{--}473 \text{ К}$, систематическая погрешность $\pm 1,5 \text{ К}$).

В ходе исследований фиксировалось: время прогорания горючего вещества t_b при отсутствии тушения; время тушения горючего вещества t_e ; объем затраченной на тушение тушащей жидкости V_e . Тушение считалось успешно достигнутым при условии $t_e \ll t_b$.

Погрешности определения времен t_b и t_e составили 0,5 с, погрешности определения объема V_e не превышали $2 \cdot 10^{-3} \text{ л}$. Систематические погрешности измерения скоростей U_g составили 2,5 %, U_d — 2 %, размеров R_d — 3 %.

Результаты и их обсуждение

В ходе цикла экспериментальных исследований установлены характеристики распыления, при которых реализуются условия ликвидации очага пожара жидкого горючего вещества, характерные времена от начала распыления до прекращения горения t_e , а также объемы воды V_e , затраченной на тушение, при различных параметрах тушащей среды, пламени и продуктов сгорания.

На рис. 2 представлены зависимости характерных времен t_e от начальной скорости движения капель тушащего состава (воды) при скорости высокотемпературных продуктов сгорания $U_g \approx 0,6 \text{ м/с}$ и дисперсности потока $R_d = 0,05 \div 0,20 \text{ мм}$. Эксперименты позволили установить, что при выбранных параметрах капельного потока воды ($R_d = 0,05 \div 0,20 \text{ мм}$, $U_d = 2,0 \div 3,5 \text{ м/с}$) значение скорости $U_g \approx 0,6 \text{ м/с}$ является максимальным, при котором достигаются условия тушения пламени жидких топлив и горючих жидкостей, использованных в опытах.

Следует отметить, что с ростом начальной скорости движения капель тушащей жидкости характерные времена тушения несколько снижаются (см. рис. 2). Полученный результат можно объяснить посредством анализа процессов торможения и разворота капель жидкости в ходе их движения в среде высокотемпературных продуктов сгорания [15]. Так, в условиях относительно невысокой начальной скорости капель ($U_d \approx 2 \text{ м/с}$) запаса их кинетической энергии недостаточно для преодоления сопротивления направленного в противоположную

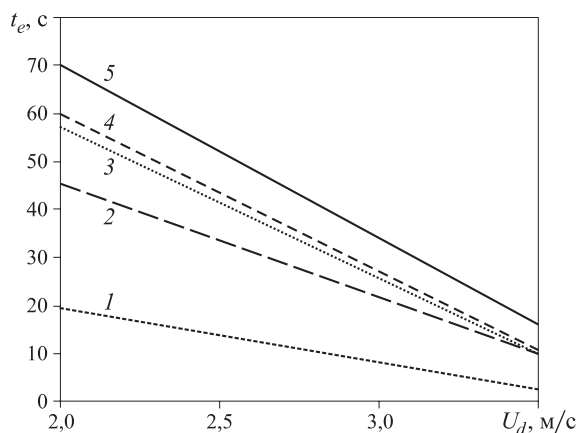


Рис. 2. Аппроксимационные зависимости характерных времен тушения пламени горючих жидкостей t_e от скоростей движения капель воды U_d при скорости продуктов сгорания $U_g = 0,6$ м/с: 1 — нефть; 2 — спирт; 3 — ацетон; 4 — керосин; 5 — бензин

сторону потока высокотемпературных продуктов сгорания. Вследствие этого часть капель (размером $R_d < 0,15$ мм), интенсивно испаряясь и не успев пройти в цилиндрическом канале и 0,5 м, разворачивается в противоположном направлении [15]. Образовавшиеся в результате испарения таких капель водяные пары уносятся из цилиндра высокотемпературным потоком продуктов сгорания, не успевая должным образом снизить температуру внутри цилиндрического канала 13 (особенно в непосредственной близости к горелке 15). С ростом же начальных скоростей движения капельного потока до $U_d \approx 3,5$ м/с капельный поток практически в полном объеме проходит путь от верхней кромки цилиндра 13 (области вдува капель) до горелки 15, при этом практически полностью испаряясь [14, 15]. Образовавшиеся в результате испарения капельного потока водяные пары интенсивно охлаждают весь внутренний объем цилиндра 13. Этим и объясняется значительное снижение характерных значений t_e (см. рис. 2).

Следует отметить, что минимальные времена тушения при выбранных параметрах распыления и характеристиках модельных очагов пожара во всех проведенных экспериментах соответствуют нефти и этиловому спирту (см. рис. 2). Такая особенность связана прежде всего с характеристиками горения данных органических веществ — температурой и высотой пламени. Так, температуры пламенного горения данных жидкостей не превышали, как правило, 750–800 К, в то время как температуры горения остальных органических жидкостей (бензин, керосин, ацетон) нередко доходили до 1150–1200 К. Поэтому для снижения температур пламени и продуктов сгорания нефти и технического спирта до предельных значений (при которых процесс горения прекращался) требовалось существенно меньшее время.

Поскольку эффективность тушения пламени в большей степени зависит от интенсивности испарения тушащей жидкости, представляет интерес экспериментальная оценка масштабов влияния предварительного нагрева распыляемой воды на характерные времена тушения t_e . На рис. 3 представлены зависимости параметра t_e от начальной температуры распыляемой воды T_w при различных скоростях продуктов сгорания используемых органических жидкостей. Можно отметить, что масштабы влияния T_w на времена тушения t_e различаются для разных условий взаимодействия капельного потока с пламенем, а также для разных горючих жидкостей. Так, при скорости продуктов сгорания $U_g \approx 3,5$ м/с и изменении начальной температуры воды T_w от 300 до 330 К изменение характерных времен t_e для пламени керосина и этилового спирта составило не более 25 %, в то время как величина t_e для пламени ацетона при тех же условиях изменилась почти в 10 раз. При этом с ростом T_w в выделенном диапазоне времена тушения возрастают (см. рис. 3).

На рис. 3 иллюстрируется в целом достаточно неочевидный результат, который можно объяснить следующим образом. В работе [16] показано, что при начальной температуре жидкости $T_w \approx 300$ К капли воды с начальным радиусом $R_d \approx 0,16$ мм испаряются полностью при движении в заполненном высокотемпературными газами цилиндре, аналогичном использованному в настоящей работе. При $T_w \approx 330$ К происходит уже полное испарение капель размером $R_d \approx 0,25$ мм [16]. Очевидно, при выбранной дисперсности $R_d = 0,05 \div 0,20$ мм предварительный нагрев тушащего состава до $T_w \approx 330$ К создает такие условия теплообмена, при которых генериру-

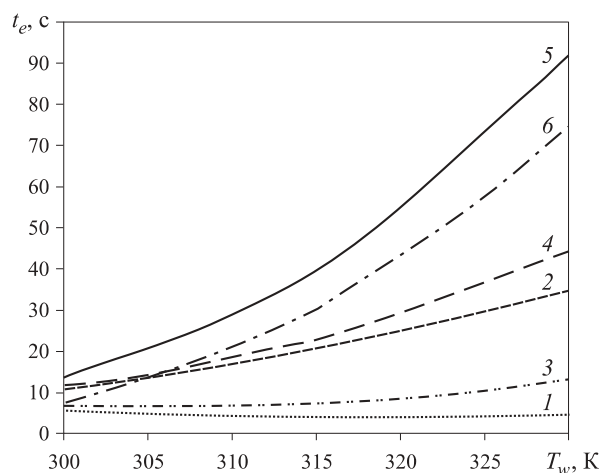


Рис. 3. Зависимость характерных времен тушения t_e типичных горючих веществ от начальной температуры воды T_w дисперсностью $R_m = 0,05 \div 0,20$ мм при $U_m \approx 3,5$ м/с: 1 — керосин, $U_g \approx 0,4$ м/с; 2 — керосин, $U_g \approx 0,6$ м/с; 3 — спирт, $U_g \approx 0,4$ м/с; 4 — спирт, $U_g \approx 0,6$ м/с; 5 — спирт, $U_g \approx 0,8$ м/с; 6 — ацетон, $U_g \approx 0,4$ м/с

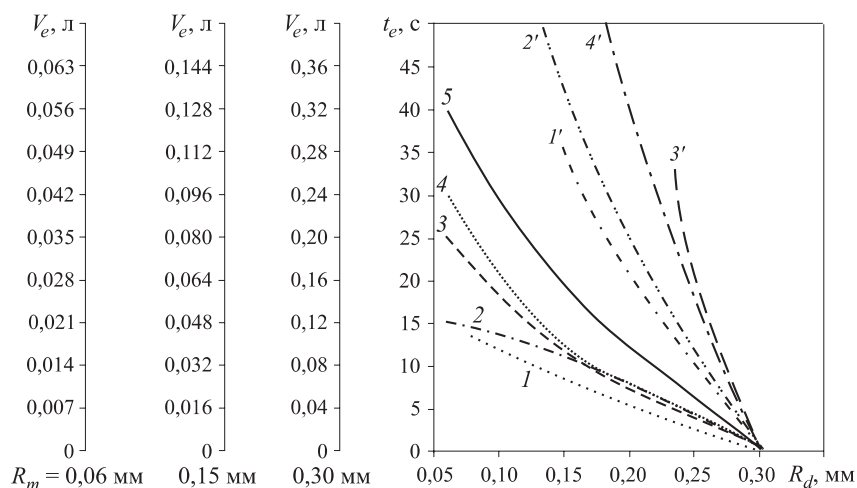


Рис. 4. Зависимость характерных времен тушения t_e типичных горючих веществ от начальных размеров капель R_d ($U_m \approx 2 \text{ м/с}$; $U_g \approx 0,4 \text{ м/с}$) при начальных температурах воды $T_w \approx 300 \text{ К}$ (1–5) и $T_w \approx 325 \text{ К}$ (1'–4'): 1, 1' — нефть; 2, 2' — спирт; 3, 3' — керосин; 4, 4' — ацетон; 5 — бензин

емый форсункой капельный поток полностью испаряется, не пройдя и половины пути внутри цилиндрического канала [16]. Образовавшиеся в результате испарения водяные пары также в полном объеме уносятся встречным потоком продуктов сгорания жидких горючих веществ. В пользу данного утверждения говорит и тот факт, что при достаточно низких скоростях движения газового потока ($U_g \approx 0,4 \text{ м/с}$) рост температуры умеренно сказывается на времени тушения, так как образовавшееся паровое облако на длительное время способно задерживаться в пламенной зоне горения. Рост скоростей газового потока до $U_g \approx 0,8 \text{ м/с}$ приводит к значительному (практически в 10 раз) увеличению времен t_d для этилового спирта, а для керосина, бензина и ацетона — к невозможности осуществления процесса тушения. Такой результат свидетельствует о необходимости оценки целесообразности подогрева тушащей жидкости при ликвидации возгораний при разных параметрах распыления.

На рис. 4 приведены зависимости времен тушения пламен жидких топлив и органических горючих жидкостей t_e от начального радиуса капель воды R_d при исходной температуре тушащей жидкости T_w 300 и 325 К. Данные рис. 4 хорошо согласуются с результатами, представленными на рис. 3: времена t_e возрастают при предварительном нагреве воды до $T_w = 325 \text{ К}$. На рис. 4 приведены также значения объемов тушащего состава V_e , израсходованного распылителем до момента прекращения горения, при разных параметрах распыления. Из рис. 4 видно, что минимальные времена t_e соответствуют самому крупному распылу. Объемы V_e при использовании для тушения потоков с различными средними размерами генерируемых капель R_m имеют близкие значения (в некоторых случаях минимальные значения V_e соответствуют высокой дисперсности потока капель). Однако использование крупнодисперсного потока наряду со своими преимуществами (дости-

жение минимальных значений t_e) имеет один существенный недостаток. При проведении экспериментов зафиксировано, что при тушении очагов бензина, керосина и нефти неиспарившиеся крупные ($R_d > 0,25 \text{ мм}$) капли воды, достигая поверхности горючей жидкости, оседают в ней ввиду большей плотности воды. Спустя примерно 2–5 с предварительно нагретая и скопившаяся в небольшие агломераты вода начинает интенсивно кипеть, что приводит к разбрызгиванию горящего топлива по стенкам цилиндра. Таким образом, на практике такой подход может привести к еще большему распространению возгорания за счет разлета горящих капель жидких органических веществ. При тушении пламен спирта и ацетона установлено, что вода, попавшая в горелку 15 (см. рис. 1), растворяется в горючем веществе. Однако последнее продолжает еще гореть, так как температура пламени в окрестностях модельного очага снижается постепенно. На практике при тушении больших объемов данных веществ (спирта либо ацетона) для снижения температур их горения потребуются колоссальные затраты воды, что нецелесообразно. К тому же при тушении резервуаров с горючими веществами чрезмерное орошение их тушащей жидкостью может вызвать перелив горячей жидкости через край резервуара и еще большее распространение возгорания. Таким образом, в качестве главного условия, обеспечивающего эффективное тушение пламен горючих жидкостей, можно выделить полное испарение капель тушащего состава по достижении ими поверхности горения.

Полученные в ходе исследований экспериментальные данные подтверждают возможность реализации тушения пламен всех использованных в опытах горючих жидкостей потоком распыленной воды. Выявленные при проведении экспериментов диапазоны параметров пламени и продуктов сгорания, а также распыленного жидкостного потока, при которых достигаются условия ликвидации модельного очага пожара, могут быть использованы при раз-

работке нового подхода к методам тушения широкого ряда жидких топлив и органических горючих жидкостей.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о целесообразности применения технологий пожаротушения, основанных на использовании полидисперсных водяных потоков, для ликвидации возгораний на объектах нефтяной, нефтеперерабатывающей и химической промышленности. Представленные в работе

экспериментальные данные могут быть использованы при прогностических оценках скорости испарения капельных водяных потоков в зоне пламени и продуктов сгорания жидких топлив, характерных времен тушения t_e , а также расчетных объемов тушащей жидкости, расходуемой при ликвидации очага возгорания.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-38-20006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. — М. : ВНИИПО МВД России, 1999. — 79 с.
2. Рекомендации по тушению полярных жидкостей в резервуарах. — М. : ВНИИПО, 2007. — 58 с.
3. Рекомендации по тушению высокооктановых бензинов АИ-92, АИ-95, АИ-98 в резервуарах. — М. : ФГУ ВНИИПО, 2009. — 12 с.
4. НПБ 105–95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. — М. : ВНИИПО МВД России, 1996. — 24 с.
5. *Макеев В. И., Пономарев А. А., Строгонов В. В.* Горение и переход к детонации газовых смесей в пространстве с загромождением // Физика горения и взрыва. — 1993. — № 3. — С. 171–174.
6. *Абдурагимов И. М.* О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 4. — С. 60–82.
7. *Дмитриенко М. А., Жданова А. О., Стрижак П. А.* Особенности испарения капель воды в пламенах типичных горючих жидкостей // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 9. — С. 25–31. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.25-31.
8. *Kuznetsov G. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A.* Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 92. — P. 360–369. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.061.
9. *Dmitrienko M. A., Zhdanova A. O., Nyashina G. S.* The characteristics of water droplet evaporation in the flames of various flammable liquids // MATEC Web of Conferences. — 2015. — Vol. 23. — Article number 01066. DOI: 10.1051/mateconf/20152301066.
10. *Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О.* Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1–2. — С. 331–335.
11. *Foucaut J. M., Stanislas M.* Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // Measurement Science and Technology. — 2002. — Vol. 13, No. 7. — P. 1058–1071. DOI: 10.1088/0957-0233/13/7/313.
12. *Stepanov E. Yu., Maslov V. P., Zakharov D. L.* A stereo PIV system for measuring the velocity vector in complex gas flows // Measurement Techniques. — 2009. — Vol. 52, No. 6. — P. 626–631. DOI: 10.1007/s11018-009-9318-z.
13. *Dehaeck S., Van Parys H., Hubin A., Van Beeck J. P. A. J.* Laser marked shadowgraphy: a novel optical planar technique for the study of microbubbles and droplets // Experiments in Fluids. — 2009. — Vol. 47, No. 2. — P. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
14. *Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.* Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area // International Journal of Thermal Science. — 2015. — Vol. 88. — P. 193–200. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
15. *Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.* Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — Vol. 85. — P. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.078.
16. *Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Анализ влияния начальной температуры распыленной воды на интегральные характеристики ее испарения при движении через зону “горячих” газов // Инженерно-физический журнал. — 2014. — Т. 87, № 2. — С. 436–444.

Материал поступил в редакцию 26 января 2016 г.

Для цитирования: Волков Р. С., Войтков И. С., Высокоморная О. В. Особенности тушения жидких топлив и органических горючих жидкостей распыленным потоком воды // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 4. — С. 68–75. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.68-75.

FEATURES OF EXTINGUISHING OF THE LIQUID FUELS AND ORGANIC FLAMMABLE LIQUIDS BY AN ATOMIZED WATER FLOW

VOLKOV R. S., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: romanvolkov@tpu.ru)

VOYTKOV I. S., Postgraduate Student of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: i.voytkov@ges.tomsk.ru)

VYSOKOMORNAYA O. V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Postdoc of Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: vysokomornaja@tpu.ru)

ABSTRACT

The work presents the results of experimental researches in extinguishing the model fire source (height is $h = 1.5$ m, diameter is $d = 0.15$ m) of oil, petrochemical products (gasoline, kerosene) and highly-flammable liquids (acetone, ethyl hydroxide). The investigations were conducted by the experimental setup, the operation of which is based on the use of advanced optical diagnostic methods of heterogeneous flows: Particle Image Velocimetry (PIV), Stereoscopic Particle Image Velocimetry (Stereo PIV), Shadow Photography (SP). The heat and mass transfer processes were recorded by high-speed (to 10^5 frames per second) and cross-correlation video cameras.

We obtained the values of extinguishing times for flames of liquids applied in the model fire source. It was revealed that for a given geometric dimensions of the model source (height is $h = 1.5$ m, diameter is $d = 0.15$ m) and parameters of atomization ($R_m = 0.05 \div 0.20$ mm, $U_m = 2.0 \div 3.5$ m/s), the value of $U_g = 0.6$ m/s is the extreme value of combustion product velocity at which the conditions of fire source liquidation are implemented.

We determined the scale of the influence of initial temperature of extinguishing liquid on the characteristic time t_e . It is shown that for selected parameters of model source and atomization conditions, the change in the temperature of extinguishing liquid within the range $T_w = 300 \div 325$ K leads to an increase in the characteristic time t_e to 10 times. Also, there are the values of the calculated volumes of extinguishing medium V_e , expended for extinguishing from the start of atomization to the implementation of the conditions of flame suppression for various dispersability of atomized water flow.

The data (obtained during the experimental researches) for the conditions of flammable liquid extinguishing by the atomized water flows can be used for developing new cost-effective methods of fire liquidation of oil and products of its processing. The received results at the proved efficiency will be possible along with a traditional technique of suppression ("foamy" attack) to apply at suppression of large ignitions on objects of production, storage and oil refining.

Keywords: liquid fuel; organic flammable liquid; flame; atomized water flow; extinguishing.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po tusheniyu nefi i nefteproduktov v rezervuarakh i rezervuarnykh parkakh* [Guidelines for extinguishing oil and petroleum products in tanks and tank farms]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of the Interior of Russia Publ., 1999. 79 p.
2. *Rekomendatsii po tusheniyu polyarnykh zhidkostey v rezervuarakh* [Recommendations for extinguishing polar liquids in tanks]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2007. 58 p.

3. *Rekomendatsii po tusheniyu vysokooktanovykh benzinov AI-92, AI-95, AI-98 v rezervuarakh* [Recommendations to extinguish the high-octane gasoline AI-92, AI-95, AI-98 in tanks]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2009. 12 p.
4. *Fire Protection Standards 105–95*. Determination of categories of rooms and buildings on explosion and fire hazard. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of the Interior of Russia Publ., 1996. 24 p. (in Russian).
5. Makeev V. I., Ponomarev A. A., Strogonov V. V. Goreniye i perekhod k detonatsii gazovykh smesey v prostranstve s zagromozhdeniyem [Burning and transition to detonation of gas mixtures in the space with clutter]. *Fizika goreniya i vzryva — Physics of Combustion and Explosion*, 1993, no. 3, pp. 171–174.
6. Abduragimov I. M. O mekhanizmax ognetyashchego deystviya sredstv pozharotusheniya [About mechanisms of fire extinguishing action of fire extinguishing means]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 60–82.
7. Dmitrienko M. A., Zhdanova A. O., Strizhak P. A. Osobennosti ispareniya kapel vody v plamenakh tipichnykh goryuchikh zhidkostey [Features of evaporation of water droplets in flames of typical flammable liquids]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 25–31. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.25-31.
8. Kuznetsov G. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 92, pp. 360–369. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.061.
9. Dmitrienko M. A., Zhdanova A. O., Nyashina G. S. The characteristics of water droplet evaporation in the flames of various flammable liquids. *MATEC Web of Conferences*, 2015, vol. 23, article number 01066. DOI: 10.1051/mateconf/20152301066.
10. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh 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.
11. Foucaut J. M., Stanislas M. Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, no. 7, pp. 1058–1071. DOI: 10.1088/0957-0233/13/7/313.
12. Stepanov E. Yu., Maslov V. P., Zakharov D. L. A stereo PIV system for measuring the velocity vector in complex gas flows. *Measurement Techniques*, 2009, vol. 52, no. 6, pp. 626–631. DOI: 10.1007/s11018-009-9318-z.
13. Dehaeck S., Van Parys H., Hubin A., Van Beeck J. P. A. J. Laser marked shadowgraphy: a novel optical planar technique for the study of microbubbles and droplets. *Experiments in Fluids*, 2009, vol. 47, no. 2, pp. 333–341. DOI: 10.1007/s00348-009-0668-8.
14. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area. *International Journal of Thermal Science*, 2015, vol. 88, pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
15. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 85, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.078.
16. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Analiz vliyaniya nachalnoy temperatury raspylennoy vody na integralnyye kharakteristiki yeye ispareniya pri dvizhenii cherez zonu “goryachikh” gazov [The analysis of the influence of initial temperature of atomized water on the integral characteristics of its evaporation while moving through the zone of “hot” gases]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Engineering and Physics Journal*, 2014, vol. 87, no. 2, pp. 436–444.

For citation: Volkov R. S., Voytkov I. S., Vysokomornaya O. V. Osobennosti tusheniya zhidkikh topliv i organicheskikh goryuchikh zhidkostey raspylennym potokom vody [Features of extinguishing of the liquid fuels and organic flammable liquids by an atomized water flow]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 68–75. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.68-75.