

М. А. ДМИТРИЕНКО, магистрант кафедры автоматизации тепло-энергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: mad2@tpu.ru)

А. О. ЖДАНОВА, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: zhdanovaao@tpu.ru)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ПЛАМЕНАХ ТИПИЧНЫХ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

С целью разработки теоретических основ технологии тушения пожаров с участием типичных горючих жидкостей и нефтепродуктов парокапельными водяными облаками исследованы процессы испарения капель воды при их движении через продукты сгорания бензина, керосина и технического спирта. Определены интегральные характеристики испарения капель воды с использованием высокоскоростной (до 10^5 кадров в секунду) видеорегистрации, панорамных кросскорреляционных комплексов (на основе PIV- и SP-методов) и специализированного программного обеспечения (Tema Automotive) для непрерывного слежения за каплями. Установлено определяющее влияние размеров генерируемых капель и начальных скоростей их движения на интенсивность прогрева и испарения капель в потоке высокотемпературных продуктов сгорания бензина, керосина и технического спирта. На основании сравнения результатов проведенных экспериментов и известной модели тепломассопереноса установлены аппроксимационные выражения для прогнозирования скоростей испарения капель воды в высокотемпературных продуктах сгорания.

Ключевые слова: высокотемпературные продукты сгорания; горючие жидкости; нефтепродукты; капли воды; испарение.

DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.25-31

Введение

Пожары на объектах добычи, переработки и транспортирования нефти, производства нефтепродуктов и горючих жидкостей являются чрезвычайно опасными по целому ряду факторов. Основными из них принято считать [1–3]: высокие скорости распространения пламени, большие температуры, мощное тепловое излучение, значительные концентрации продуктов сгорания, турбулентное перемешивание их с окислителем за счет притока его с периферии, сопутствующие факторы (взрывы, значительные экономические последствия). Традиционно для тушения таких пожаров применяют довольно сложные по компонентному составу и дорогостоящие пенообразующие вещества [1–3]. Основной акцент при этом делается на предотвращении доступа окислителя в зону горения [1–3]. Исходя из анализа расхода тушащих средств и времени подавления горения, специалисты нередко приходят к заключению о довольно невысокой эффективности известных применяемых технологий тушения [1–3].

В последние 5–7 лет во многих развитых странах мира (в частности, в Великобритании, Германии, США, России, Китае) проводятся исследования по созданию технологий локализации и тушения различных типов пожаров с применением парокапельных водяных потоков [4–8], как наиболее ресурсоэффективных и экономически выгодных. К таким системам [4–8] можно отнести, например, водяной туман, водяную завесу, тонкораспыленную воду. Все эти технологии в настоящее время внедряются на промышленных и административных объектах. Однако для технологических объектов, на которых обрабатываются нефть, нефтепродукты и различные горючие жидкости, такие технологии пожаротушения не разработаны. Известны лишь результаты применения водяных струй для тушения пожаров на объектах такого типа [1–3]. Эту ситуацию можно объяснить сложностью взаимосвязанных процессов тепломассопереноса и фазовых превращений при движении капельных потоков воды через пламя при пожарах нефти, нефтепродуктов и типичных горючих жид-

костей. В связи с этим целесообразно проведение экспериментальных исследований с целью создания физических и математических моделей, позволяющих прогнозировать характеристики испарения капель воды и снижения концентрации продуктов сгорания и окислителя в зоне горения. Основные трудности экспериментальных исследований заключаются в определении положения границы раздела фаз *капля жидкости – высокотемпературная газовая среда* при движении водяных капель через высокотемпературные продукты сгорания. Получившие широкое применение в последние годы оптические методы (Particle Image Velocimetry (PIV), Shadow Photography (SP) и др.) и высокоскоростные средства видеорегистрации позволяют решать поставленные в исследованиях задачи. Например, в работах [9–11] приведены результаты исследований процессов испарения одиночных капель и их групп в пламени керосина (с контролируемой температурой и скоростью движения продуктов сгорания). Для распространения этих результатов исследований на типичные горючие жидкости и нефтепродукты целесообразно проведение исследований для нескольких, наиболее широко известных, отличающихся температурами возгорания и пламени жидкостей, например бензина, керосина и технического спирта. В экспериментах [9–11] показано, что капли с начальными размерами (диаметрами) менее 0,5 мм существенно тормозятся продуктами сгорания и даже уносятся ими из пламени. Поэтому для решения задач исследований процессов испарения целесообразно начальные размеры капель выбирать более 1 мм (согласно [4–8] такие капли принято считать крупными).

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование особенностей испарения одиночных крупных капель воды в высокотемпературных продуктах сгорания типичных горючих жидкостей и нефтепродуктов.

Экспериментальный стенд и методы исследований

При исследовании особенностей испарения капель воды в высокотемпературных продуктах сгорания использовался экспериментальный стенд, внешний вид которого приведен на рис. 1. Стенд обеспечивал видеорегистрацию процесса прохождения одиночными каплями воды расстояния 1 м (протяженность высокотемпературной зоны) от дозатора 12 до уловителя 14. Начальные размеры (радиусы) капель и скорости их вхождения в пламена составили 2–3 мм и 2–4 м/с соответственно.

Стенд (см. рис. 1) включал две высокоскоростные (до $6 \cdot 10^5$ кадров в секунду) видеокамеры 1 и 2 [12, 13], регистрационный комплекс на базе кросс-корреляционных видеокамер 3 и 4, двойного твер-

дотельного импульсного лазера 18, синхронизатора сигналов 17, генератора лазерного излучения 19, специализированной рабочей станции 6.

Внутреннюю полость цилиндра 15 (горелки) заполняли горючей жидкостью, которую затем зажигали. Использовали бензин (марка АИ-92), керосин (марка ТС-1) и технический спирт. Всю внутреннюю полость цилиндрического канала 13 (высотой 1 м, с внутренним диаметром 0,2 м) заполняли высокотемпературной газовой средой (продукты сгорания). Канал выполнен из кварцевого стекла для возможности регистрации траекторий перемещения капель воды в пламени. Для достижения требуемых температур газов в канале 13 выдерживалась временная задержка 200 с (с момента зажигания жидкости в

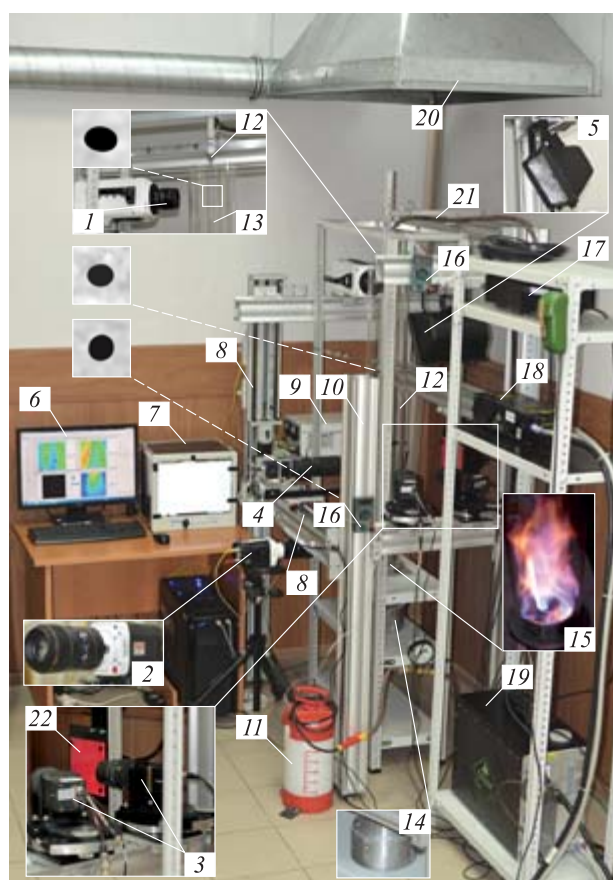


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда: 1, 2 — высокоскоростные видеокамеры; 3, 4 — кросс-корреляционные видеокамеры; 5 — осветительный прожектор; 6 — рабочая станция; 7 — регистратор многоканальный технологический (PMT); 8 — моторизированное координатное устройство (МКУ); 9 — блок питания МКУ; 10 — алюминиевая стойка; 11 — емкость с водой; 12 — дозирующее устройство последовательной подачи капель; 13 — цилиндр из кварцевого стекла; 14 — уловитель капель; 15 — полый цилиндр с горючей жидкостью; 16 — цифровой мультиметр; 17 — синхронизатор ПК, кросс-корреляционной камеры и лазера; 18 — двойной твердотельный импульсный лазер; 19 — генератор лазерного излучения; 20 — нагнетательная система; 21 — канал подачи воды; 22 — диффузионный экран в комплекте со световодом

горелке 15). Далее вода из емкости 11 подавалась по каналу 21 на вход дозирующего устройства 12, а затем — в канал 13, по которому капли двигались по оси его симметрии сверху вниз. Процесс перемещения капель в высокотемпературной газовой среде регистрировали видеокамерами 1 и 2, а также кросс-корреляционными камерами 3 и 4. Отснятые фото- и видеоизображения передавали на рабочую станцию 6, где выполнялась их обработка с применением оптических методов PIV и SP, а также специализированного программного обеспечения “Tema Automotive”.

В качестве функций цели при обработке экспериментальных данных приняты следующие параметры: радиус R_d (м) и скорость движения U_d (м/с) каплей. Проводилось не менее 10 серий экспериментов при идентичных начальных условиях (радиусы R_d и скорости перемещения U_d капель; температуры T_f (К) и скорости движения U_f (м/с) продуктов сгорания).

Температура продуктов сгорания T_f в используемом канале 13 изменялась в диапазоне от 400 до 1900 К. Измерения проводились тремя вольфрам-рений-вольфрамениевыми термопарами (диапазон измеряемых температур 0–2473 К, допустимое отклонение $\Delta = \pm 0,005 T_f$). Начальная температура вводимых в газовую среду капель воды поддерживалась в пределах 300 К с помощью системы нагревательных камер и регистрировалась хромель-копелевой термопарой в комплекте с мультиметром 16 (диапазон измеряемых температур 233–573 К, допустимое отклонение $\Delta = 2,5$ К).

Скорость движения газов U_f по рассматриваемому цилиндрическому каналу составляла 1,5 м/с. Для контроля параметра U_f использовали панорамный оптический метод PIV. Измерение скоростей данным методом основано на регистрации перемещений трассеров (наночастиц с требуемой отражающей способностью) в плоском сечении потока за фиксированное время (интервал между вспышками лазера 18). Нанопорошок вводили в нижнюю часть канала 13. Частицы многократно освещали световым “ножом” лазера 18, а их образы регистрировали кросс-корреляционной видеокамерой 4 по всей высоте канала 13. Полученные видеogramмы обрабатывали специальным программным обеспечением “Actual Flow”. В ходе обработки видеogramмы разбивали на элементарные области, для каждой из которых посредством преобразования Фурье находили максимум корреляционной функции, который соответствовал смещению частиц в отдельной элементарной области. Затем при известной временной задержке и масштабном коэффициенте S (найденном на начальном этапе калибровки оптической системы) осуществляли пересчет скорости в метры в секунду.

Скорости перемещения капель воды определяли с использованием высокоскоростной съемки и обработки видеogramм программным комплексом “Tema Automotive”. Максимальные систематические погрешности определения скоростей U_d и U_f составили 0,1 м/с.

Для определения размеров капель применяли метод SP, основанный на регистрации теневой фотографии объекта, имеющего коэффициент преломления, отличный от окружающей его среды. Для этого перед кросс-корреляционными камерами 3 и 4 за каплями размещали диффузный источник света с равномерным пространственным распределением интенсивности, достигаемым путем рассеяния лазерного луча с применением специального световода и диффузионного экрана 22. Фотосъемку потока капель осуществляли камерами 3 и 4. Далее отснятые изображения подвергали цифровому анализу, в ходе которого определяли положение, форму и характерный размер капель. Систематические погрешности определения размера R_d не превышали 10^{-5} м, максимальные случайные погрешности — 2,1 %.

Аналогично экспериментам [9–11] в качестве интегрального параметра для определения скорости испарения капель воды в высокотемпературных продуктах сгорания использовали параметр ΔR (%): $\Delta R = (R_d - R_d^*) \cdot 100 / R_d$ (где R_d^* — размер капли после прохождения через высокотемпературные газы, м).

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований установлено определяющее влияние размеров генерируемых капель на интенсивность их прогрева и испарения в потоке высокотемпературных продуктов сгорания типичных горючих жидкостей и нефтепродуктов (бензина, керосина и технического спирта).

На рис. 2,а приведены типичные зависимости параметра ΔR от размера R_d при начальной скорости движения капель $U_d \approx 2$ м/с. Установлено, что капли с начальным размером 2–3 мм при прохождении расстояния 1 м в высокотемпературном встречном газовом потоке продуктов сгорания бензина уменьшаются в среднем на 15 %, а в пламени керосина и технического спирта — на 7 и 5 % соответственно. Таким образом, при идентичных начальных размерах и скоростях движения капель установлены существенно нелинейные зависимости между долей испарившейся воды ΔR и размером капель. Полученные результаты можно объяснить тем, что с увеличением начального радиуса капель воды возрастает время прогрева их приповерхностного слоя до температуры начала интенсивного парообразования. Это заключение можно отнести к продуктам сгорания всех использованных в экспериментах горючих жидкостей.

На рис. 2,б приведены зависимости типичных значений параметра ΔR от начальной скорости U_d при размере каплей около 2,5 мм. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что увеличение начальной скорости движения каплей довольно существенно влияет на время перемещения их в потоке высокотемпературных продуктов сгорания. Этим обусловлено умеренное уменьшение параметра ΔR для каплей, имеющих начальную скорость 4 м/с, по сравнению с каплями с начальной скоростью 2 м/с. Эти закономерности хорошо коррелируют с выявленными в экспериментах [14] и при численном моделировании [15] особенностями. В частности, в [14, 15] отмечено, что скорости испарения каплей жидкостей в высокотемпературных газах не лимитируются только диффузионными процессами, а могут кратно изменяться при увеличении времени нагревания каплей, а также при уменьшении их размеров и скорости движения. Полученные в настоящей работе результаты показывают, что выявленные в [14, 15] закономерности прогрева и испарения каплей воды соответствуют различным типичным горючим жидкостям и нефтепродуктам. Если учитывать, что условия горения большой группы нефтей в целом соответствуют рассмотренным жидкостям, то полученные результаты можно распространять на широкий круг нефтей и нефтепродуктов.

В [14, 15] также отмечено, что определяющее влияние на скорость испарения каплей жидкости оказывает температура продуктов сгорания нефтепродуктов. Аналогичное заключение можно сделать и по результатам проведенных в настоящей работе экспериментов. В частности, при прохождении каплями расстояния 1 м через продукты сгорания бензина замечен существенный рост ΔR по сравнению с керосином и техническим спиртом. Эту закономерность можно объяснить соответствующим различием температур продуктов сгорания.

Так, на рис. 3 представлены аппроксимационные кривые распределения температуры продуктов сгорания по всей высоте цилиндрического канала 13. Температура газов (продуктов сгорания) T_f в экспериментах для бензина составила 532–1882 К, керосина — 422–1611 К и технического спирта — 400–1550 К. Измерения проводили относительно основания цилиндрического канала 13 (соответствует горелке 15).

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, позволяет выявить различия в скоростях прогрева каплей в высокотемпературных продуктах сгорания использованных в исследованиях горючих жидкостей. Важно отметить, что отклонения характерных параметров ΔR на рис. 2 соответствуют разнице температур продуктов сгорания на рис. 3. При этом следует отметить удовлетворительную корре-

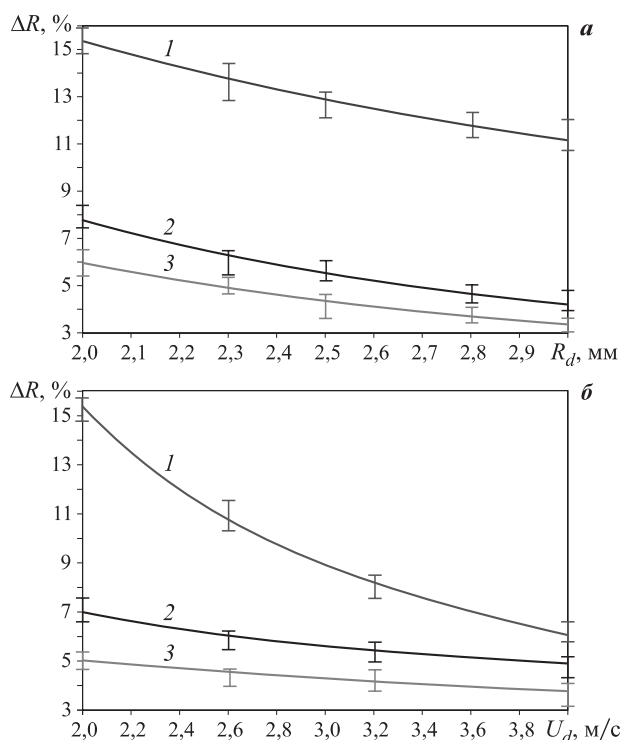


Рис. 2. Зависимость ΔR от начального размера каплей при $U_d = 2$ м/с (а) и от скорости их движения при $R_d = 2,5$ мм (б) при прохождении расстояния 1 м в высокотемпературных продуктах сгорания бензина (1), керосина (2) и технического спирта (3)

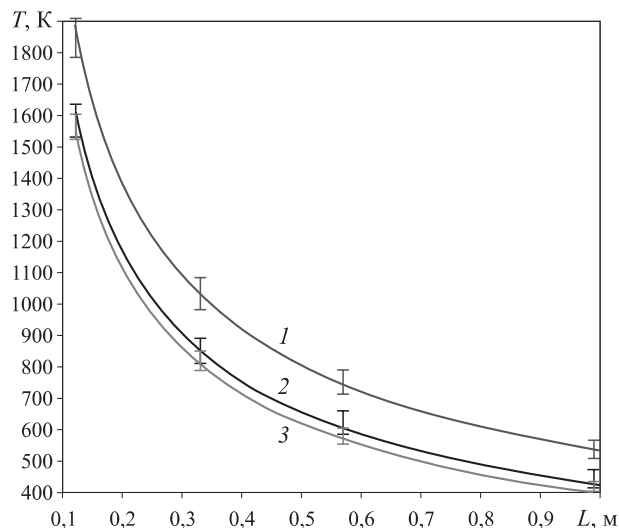


Рис. 3. Распределение температуры продуктов сгорания бензина (1), керосина (2) и технического спирта (3) в рабочем канале (по высоте L относительно горелки)

ляцию с нелинейными зависимостями скорости испарения каплей воды от температуры поверхности [14, 15]. При использовании подхода [14] и модели тепломассопереноса [15] для полученных в настоящей работе экспериментальных значений параметра ΔR при известных начальных значениях R_d , U_d и T_f можно установить аппроксимационные выражения для массовых скоростей испарения. Так, напри-

мер, для рассмотренных в настоящей работе диапазонов $R_d = 2\div 3$ мм и $U_d = 2\div 4$ м/с определены соответствующие интервалы изменения параметра ΔR . С применением последних установлено, что средние значения скорости испарения в зависимости от температуры газов можно описать аппроксимацией:

$$W_e = 0,0004 \exp[0,0059T_f], \\ 2 < R_d < 3 \text{ мм}, \quad 2 < U_d < 4 \text{ м/с}.$$

Для получения этой аппроксимации, помимо модели [15], использовали балансное соотношение, учитывающее на границе *капля воды – высокотемпературная газовая среда* расход энергии на реализацию эндотермических фазовых превращений, прогрев формирующихся “холодных” паров, а также конвективно-кондуктивный подвод тепла.

Используя такой подход для капель с меньшими размерами и данные экспериментов [10, 11], можно выделить следующие аппроксимации:

$$W_e = 0,0008 \exp[0,0053T_f], \\ 0,5 < R_d < 1 \text{ мм}, \quad 2 < U_d < 4 \text{ м/с}; \\ W_e = 0,0047 \exp[0,0043T_f], \\ 0,1 < R_d < 0,5 \text{ мм}, \quad 2 < U_d < 4 \text{ м/с}.$$

Следует отметить, что с использованием аппроксимаций такого вида довольно просто оценить условия, необходимые и достаточные для полного испарения воды в пламени при его известной температуре при пожарах нефтепродуктов. Эксперименты, выполненные для разных нефтепродуктов и горючих жидкостей, показали, что представленные аппроксимации можно применять при пожарах различных видов нефтей и нефтепродуктов. Скорости испарения капель существенно зависят от их начальных размеров, поэтому для создания общей базы данных по максимальным скоростям испарения капель воды, эмульсий и суспензий на ее основе в пламени при пожарах нефтепродуктов можно использовать представленный в настоящей работе подход

(с варьированием начальных размеров капель в широком диапазоне, соответствующем технологиям [4–8]). Наличие такой базы позволит определять параметры парокапельных облаков, необходимые и достаточные для обеспечения их эффективного воздействия при локализации и подавлении пожаров жидких нефтепродуктов.

Заключение

Несмотря на установленные отклонения значений ΔR для пожаров рассмотренных типичных горючих жидкостей и нефтепродуктов, можно сделать вывод о хорошей в целом корреляции интегральных характеристик испарения капель воды в выделенных условиях. Это позволяет обобщить результаты исследований с целью распространения их на широкий круг типичных нефтепродуктов. В частности, удовлетворительное согласование экспериментальных данных и результатов моделирования [14, 15] показывает, что для прогнозирования требуемых параметров капель в системах тушения пожаров с участием горючих жидкостей и нефтепродуктов можно использовать модели [14, 15] и приведенные в настоящей работе аппроксимационные выражения для скорости испарения. В зависимости от высоты пламени, температуры и свойств продуктов сгорания можно определять требуемые размеры капель в пароводяном облаке для минимизации расхода воды и обеспечения максимальных концентраций водяных паров (соответственно, минимальных для продуктов сгорания и окислителя). Эти результаты важны для развития теоретических основ создания эффективных технологий тушения пожаров с участием нефти и нефтепродуктов пароводяными облаками.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 15-38-20006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Собурь С. В. Пожарная безопасность нефтегазохимических предприятий : справочник. — М. : ПожКнига, 2004. — 431 с.
2. Молчанов В. П. Основные принципы обеспечения пожарной безопасности объектов добычи нефти и газа // Пожарная безопасность. — 2004. — № 1. — С. 29–32.
3. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. — М. : Пожнаука, 2007. — 268 с.
4. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Bulgakov V. K., Galat A. A. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles // Fire Safety Science : Proceeding of Eighth International Symposium. — 2005. — Vol. 8. — P. 753–764. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-753.
5. Соколов В. В., Тугов А. Н., Гришин В. В., Камышев В. Н. Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях // Энергетик. — 2008. — № 6. — С. 37–38.
6. Корольченко Д. А., Громовай В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 54–57.

7. *Виноградов А. Г.* Учет спектрального состава теплового излучения при расчете коэффициента пропускания капли воды // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 64–73.
8. *Виноградов А. Г.* Применение теории затопленных струй к расчету параметров водяных завес // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 76–87.
9. *Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.* Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2013. — Vol. 86, No. 6. — P. 1413–1418. DOI: 10.1007/s10891-013-0967-z.
10. *Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.* Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone // *Fire Safety Journal*. — 2014. — Vol. 70. — P. 61–70. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.016.
11. *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 Sciences*. — 2015. — Vol. 88. — P. 193–200. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
12. *Janiszewski J.* Measurement procedure of ring motion with the use of high-speed camera during electromagnetic expansion // *Metrology and Measurement Systems*. — 2012. — Vol. 19, No. 4. — P. 797–804.
13. *Janiszewski J.* Ductility of selected metals under electromagnetic ring test loading conditions // *International Journal of Solids and Structures*. — 2012. — Vol. 49, No. 7–8. — P. 1001–1008. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.01.005.
14. *Kuznetsov G. V., Kuybin P. A., Strizhak P. A.* Estimation of the numerical values of the evaporation constants of water droplets moving in a high-temperature gas flow // *High Temperature*. — 2015. — Vol. 53, No. 2. — P. 254–258. DOI: 10.1134/S0018151X15020133.
15. *Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.* Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2014. — Vol. 87, No. 1. — P. 103–111. DOI: 10.1007/s10891-014-0990-8.

Материал поступил в редакцию 30 мая 2015 г.

Для цитирования: *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.

English

FEATURES OF EVAPORATION OF WATER DROPLETS IN FLAMES OF TYPICAL FLAMMABLE LIQUIDS

DMITRIENKO M. A., Master, 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: mad2@tpu.ru)

ZHDANOVA A. O., Postgraduate Student, 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: zhdanovaa@tpu.ru)

STRIZHAK P. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, 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: pavelspa@tpu.ru)

ABSTRACT

This article presents the results of experimental investigations of the evaporation of water droplets under velocity conditions through a typical combustion of flammable liquids and oil products. The studies were focused on creating an experimental basis, sufficient for the development of the basic elements of fire extinguishing technologies using atomized water. It is established a determining influence of the sizes of generated droplets and initial velocities of their movement on the intensity of heating and evaporation of the droplets in the stream of high-temperature combustion products of gasoline, kerosene, and commercial alcohol. The results of experimental studies with the known model of heat

and mass transfer are compared. An approximate expressions to predict the velocities of evaporation of water droplets in the combustion products of typical flammable liquids and oil products are determined. It is distinguished an opportunity to fairly simple assess of necessary and sufficient conditions for the complete evaporation of the water in the flames of oil products (at a known temperature of the flame).

Keywords: high-temperature combustion gases; flammable liquids; oil products; water droplets; evaporation.

REFERENCES

1. Sobur S. V. *Pozharnaya bezopasnost neftegazokhimicheskikh predpriyatiy: spravochnik* [Fire safety in petrochemical enterprises. Guide]. Moscow, PozhKniga Publ., 2004. 431 p.
2. Molchanov V. P. Osnovnyye printsipy obespecheniya pozharnoy bezopasnosti ob'yektov dobychi nef'ti i gaza [Basic principles of fire safety of oil and gas producing enterprises]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2004, no. 1, pp. 29–32.
3. Gorshkov V. I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing the flame of combustible liquids]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 268 p.
4. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Bulgakov V. K., Galat A. A. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science: Proceeding of Eighth International Symposium*, 2005, vol. 8, pp. 753–764. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.8-753.
5. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozhartusheniye s primeneniym tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automated water fire-fighting system using water spray on power plants]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
6. 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
7. Vinogradov A. G. Uchet spektralnogo sostava teplovogo izlucheniya pri raschete koeffitsienta propuskaniya kapli vody [Accounting of thermal radiation spectral distribution at calculation of water droplet transmittance]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 64–73.
8. Vinogradov A. G. Primeneniye teorii zatoplennykh struy k raschetu parametrov vodyanykh zaves [Application of the submerged jet theory to calculation of water curtain parameters]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 76–87.
9. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 6, pp. 1413–1418. DOI: 10.1007/s10891-013-0967-z.
10. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone. *Fire Safety Journal*, 2014, vol. 70, pp. 61–70. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.016.
11. 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 Sciences*, 2015, vol. 88, pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
12. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion. *Metrology and Measurement Systems*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 797–804.
13. Janiszewski J. Ductility of selected metals under electromagnetic ring test loading conditions. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, vol. 49, no. 7–8, pp. 1001–1008. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.01.005.
14. Kuznetsov G. V., Kuybin P. A., Strizhak P. A. Estimation of the numerical values of the evaporation constants of the water drops moving in the high temperature gas flow. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 2, pp. 254–258. DOI: 10.1134/S0018151X15020133.
15. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 1, pp. 103–111. DOI: 10.1007/s10891-014-0990-8.

For citation: 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]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 25–31. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.25-31.