УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИСПАРЕНИЯ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГАЗЫ

Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8).

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения типичных распыленных тушащих жидкостей при их движении через пламя ограниченных размеров. Установлено влияние содержания примесей солей на полноту испарения тушащей жидкости. Определены диапазоны изменения основных интегральных характеристик испарения капель распыленных жидкостей: размеры, масса и скорость. Сформулированы рекомендации относительно параметров распыления типичных тушащих жидкостей, при которых обеспечивается полнота их испарения.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы достаточно интенсивно обсуждаются перспективы использования тонкораспыленной воды при тушении пожаров различной степени сложности [1–5]. Сформулированы мнения как о целесообразности использования таких флегматизаторов горения, так и их бесполезности. Известны предположения о том, что весь поток распыленной воды испарится до непосредственного контакта с горящими материалами или конструкциями [4] и, как следствие, пожар не будет ликвидирован. В тоже время опубликованы результаты теоретических исследований [1–3, 5-7], которые показывают, что распыленные флегматизаторы горения могут достаточно эффективно как локализовать пламя, так и оперативно ликвидировать очаг возгорания в целом.

В частности, в результате выполнения цикла численных исследований [5–7] установлены зависимости времени существования капель распыленной воды от компонентного состава, размеров, скорости и траекторий движения капель, температуры продуктов сгорания (пламени) и других факторов. Представляет интерес проведение экспериментальных исследований с применением высокоскоростного измерительного программно-аппаратного комплекса диагностики двухфазных потоков для оценки правомерности основных теоретических заключений [5–7].

Цель работы – экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения типичных распыленных тушащих жидкостей при движении через высокотемпературные продукты сгорания и сопоставление результатов с теоретическими следствиями [5–7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

При проведении экспериментов использовалась схема, предусматривающая распыление рабочих жидкостей (состав № 1: H_2O – 99,5 %, TiO_2 – 0,5 %; состав № 2: H_2O – 97 %, TiO_2 – 0,5 %, NaCl – 2,5 %) с определённой высоты в зону пламени (рис. 1). Наночастицы диоксида титана (TiO_2) выступали в роли «трассеров» [8] и введены в составы рабочих жидкостей для повышения четкости видеокадров при «просвечивании» лазером траектории движения двухфазной парожидкостной смеси через поток высокотемпературных продуктов сгорания. Поваренная соль (NaCl) введена в состав № 2 для анализа отличий интегральных харак-

теристик испарения распыленных соленой и пресной воды.

В сериях экспериментов рабочие жидкости указанных составов поочередно заливались в емкость *7* (рис. 1). Формирование потока распыленной жидкости осуществлялось дозатором *9*, обеспечивающим постоянство концентраций и размеров капель от эксперимента к эксперименту. Для регистрации видеограмм с изображением движущегося двухфазного газопарожидкостного потока использовалась измерительная PIV-система, состоящая из генератора лазерного излучения *3*, двойного твердотельного импульсного лазера *4* (длина волны – 532 нм, энергия в импульсе – не менее 70 мДж, длительность импульса – не более 12 нс, частота повторений – не более 15 Гц), подсвечивающего области съемки посредством «светового ножа» *6*, кросскорреляционной камеры *5* (формат изображения – 2048x2048 пикселей, кадровая частота – не менее 1,5 Гц, минимальная задержка между двумя кадрами – не более 5 мкс), фиксирующей изображения потока жидкости на входе и выходе цилиндрического канала *13*, синхронизатора *2* (дискретизация сигналов – не более 10 нс, поддержка режимов внешнего и внутреннего запуска) и ПК *1* с программным обеспечением, позволяющим «кадрировать» результаты съёмки и строить поля скоростей двухфазного потока в рабочей области. Особенности использования типичных диагностических PIV-систем и соответствующих измерительных методик описаны в [8].

Для регистрации температуры продуктов сгорания использовалась методика термопарных измерений. Измерения температуры выполнялись хромель-копелевыми термопарами *15* на разных отметках по высоте (0,15 м; 0,5 м; 0,85 м) в зоне движения продуктов сгорания. Температура продуктов сгорания составила 1070 ± 30 К. Важно отметить, что установленные значения температуры соответствуют средней температуре в типичных очагах пожаров [9].

Для каждого состава рабочей жидкости проведены циклы опытов, включающие две серии по десять экспериментов. В первой серии экспериментов фиксировались видеокадры распыленной рабочей жидкости на входе в цилиндрический канал *13* (высота 1 м, радиус 0,15 м). Во второй серии регистрировались изображения капель после прохождения ими зоны пламени. Для формирования устойчивого пламени использовалось типичное жидкое топливо – керосин, которое заполняло основание полого цилиндра *14* экспериментальной установки (в каждом опыте использовалось 0,25 л).

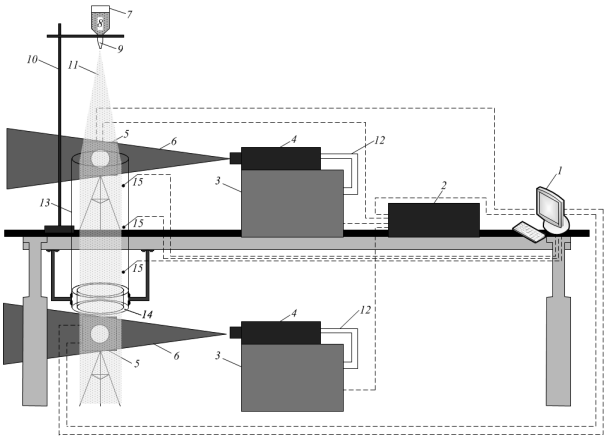


Рис.1 Схема экспериментальной установки: 1 – ПК; 2 – синхронизатор; 3 – генератор лазерного излучения; 4 – двойной твердотельный импульсный лазер; 5 – кросскорреляционная камера; 6 – световой «нож»; 7 – ёмкость с рабочей жидкостью; 8 – рабочая жидкость; 9 – дозатор; 10 – штатив; 11 – капли рабочей жидкости; 12 – канал движения вспомогательной охлаждающей жидкости; 13 – цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 14 – полый цилиндр с горючей жидкостью; 15 – термопары.

По полученным в экспериментах видеокадрам определялись интегральные параметры, характеризующие движение капель распыленной рабочей жидкости через пламя. В качестве последних приняты: масса, размеры и скорость капель в рабочей области. Для удобства оценки изменения перечисленных характеристик испарения капель при движении через пламя последние условно разделены на три группы: «малые» – $0,075 < R_м < 0,175$ мм; «средние» – $0,175 < R_с < 0,275$ мм; «большие» – $0,275 < R_б < 0,375$ мм.

При обработке видеограмм строились поля скоростей распыленной жидкости. Обработка видеоизображений основана на типичном для PIV-систем кросскорреляционном алгоритме, представляющем метод быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения

корреляционной теоремы [8]. Для уменьшения случайных корреляций в процессе обработки видеограмм применялись наложенные «Top-hat» весовые функции.

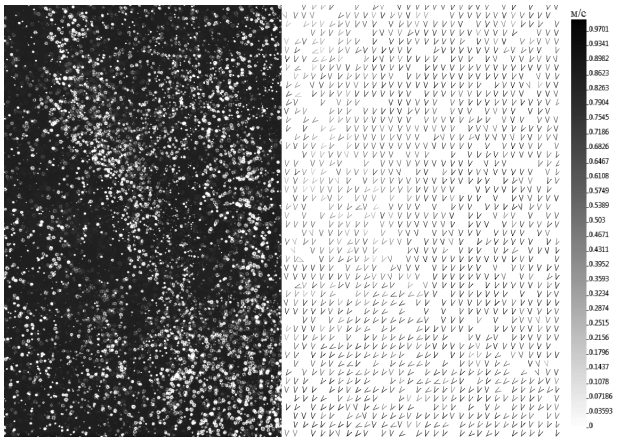
Погрешности определения размеров капель согласно методике [10] составили 0,001 мм. Случайные погрешности измерения массы капель для рассматриваемой установки (рис. 1) не превысили 1 %. Среднеквадратичные отклонения массы в серии опытов составили меньше 10^{-6} г [10]. Погрешность определения скоростей капель не превышала 2 % [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

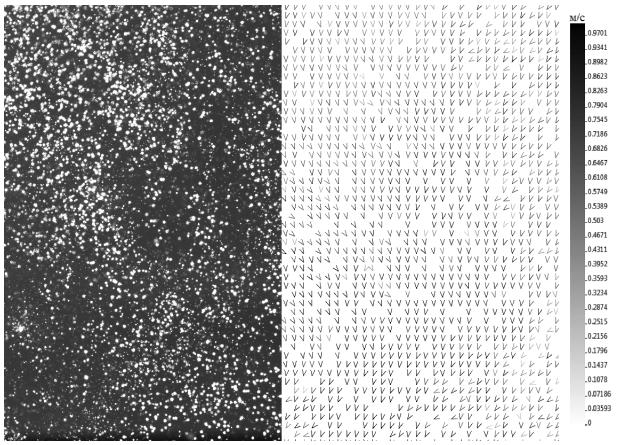
Полученные при проведении опытов типичные видеокадры распыленной рабочей жидкости обоих составов на входе и выходе канала, а также соответствующие им поля скоростей приведены на рис. 2, 3. Для используемых в экспериментах составов показано, что при прохождении распыленной жидкостью высокотемпературной зоны пламени (рис. 3) наблюдается значительное снижение общей концентрация капель относительно начальной (рис. 2), что говорит о достаточно высокой скорости испарения последних. Однако следует отметить, что для состава № 2 (рис. 3, *б*) характерно наличие более крупных капель на выходе из области горения, чем для состава № 1 (рис. 3, *а*).

По результатам обработки полученных видеограмм оценены изменения средних размеров капель обоих составов. Так, для рабочей жидкости № 1 размеры «больших» капель снижаются в среднем на 32,5 %, размер «средних» - на 47 %. Те же изменения для состава № 2 составляют: для «больших» - 23,9 %, для «средних» - 46,4 %. То есть, можно констатировать, что при достижении каплями средних размеров $0{,}175 < R < 0{,}275$ мм, влияние примесей NaCl в рабочей жидкости становится уже несущественно. Данное утверждение подкрепляет тот факт, что на выходе из области горения для обоих составов характерно полное отсутствие «малых» капель ($0{,}075 < R_м < 0{,}175$ мм).

Анализ полученных в ходе проведения цикла экспериментов результатов показывает, что средние скорости капель на выходе из области горения $\upsilon_{ср}$ снижаются для состава № 1 на 0,272 м/с, для состава № 2 на 0,308 м/с относительно скоростей на входе в канал (начальные скорости капель на входе составили 0,751 м/с). Снижение $\upsilon_{ср}$ можно объяснить как встречным движением продуктов сгорания, так и интенсивным фазовым переходом при парообразовании. Полученный результат хорошо коррелирует с зависимостями, полученными при проведении численного моделирования [5–7] для скоростей и характерных времен существования водяных капель различных размеров.



а

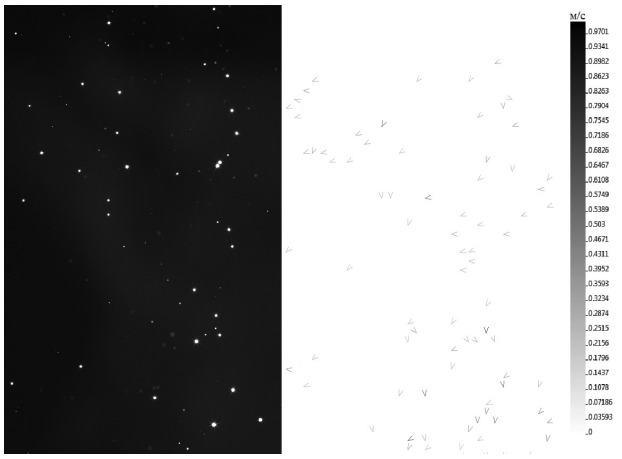


б

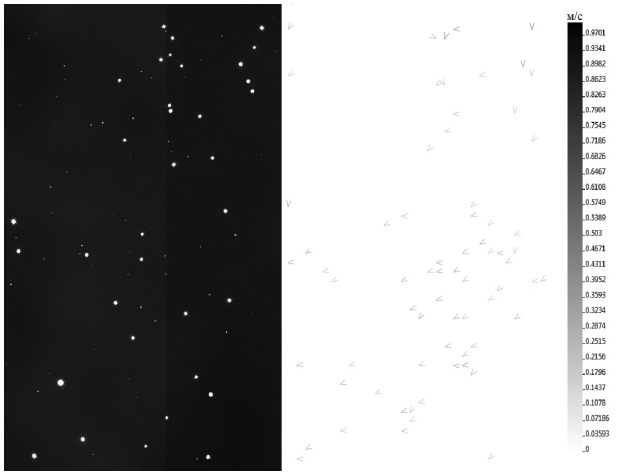
Рис.2 Видеограммы и поля скоростей «трассирующих» частиц жидкости на входе в канал: *1* – рабочая жидкость № 1 (H_2O – 99,5 %, TiO_2 – 0,5 %); *2* – рабочая жидкость № 2 (H_2O – 97 %, TiO_2 – 0,5 %, NaCl – 2,5 %).

По полученным в серии опытов экспериментальным значениям $m_{ср}$ построены зависимости для интегрального параметра Δm (рис. 4), иллюстрирующие характерные отличия интенсивности испарения исследуе-

мых распыленных рабочих жидкостей (состав № 1 и № 2).



а



б

Рис.3 Зависимости параметра Δm от $m_{ср}$: *1* – рабочая жидкость № 1 (H_2O – 99,5 %, TiO_2 – 0,5 %); *2* – рабочая жидкость № 2 (H_2O – 97 %, TiO_2 – 0,5 %, NaCl – 2,5 %).

На рис. 4 $m_{ср}$ – средняя масса капель на входе в пламя;

$$\Delta m = \frac{m_{ср.вх} - m_{ср.вых.}}{m_{ср.вх}} \cdot 100\%$$

– параметр, характеризующий уменьшение массы капли после прохождения пламени.

Установлено, что при средней массе капель $m_{ср} < 5{,}6 \cdot 10^{-5}$ г отклонения параметра Δm для исследуемых составов не превышают 5 % (рис. 4). При увеличении $m_{ср}$ влияние примесей NaCl на интенсивность испарения усиливается. Так, например, при $m_{ср} = 8 \cdot 10^{-5}$ г значение параметра Δm для рабочей жидкости № 1 составляет 76 %, а для рабочей жидкости № 2 – 65 %. При $m_{ср} = 1 \cdot 10^{-4}$ г те же параметры равны 72 % и 56 % соответственно. Выявленную закономерность можно объяснить тем, что примеси солей, в частности NaCl, существенно замедляют процессы фазового перехода вследствие повышения теплоемкости рабочей жидкости и необходимости подвода большего количества тепла для интенсификации парообразования по сравнению с пресной водой. При уменьшении массы капель относительно $m_{ср} = 5{,}6 \cdot 10^{-5}$ г характерные времена существования последних в потоке высокотемпературных газов значительно снижаются для исследуемых рабочих жидкостей (состав № 1 и 2). Подведенной энергии достаточно для прогрева капель малых размеров жидкости без и с примесями NaCl за практически равные времена. Влияние примесей NaCl несколько ослабляется и характерные значения Δm для исследуемых рабочих жидкостей становятся сопоставимыми (рис. 4).

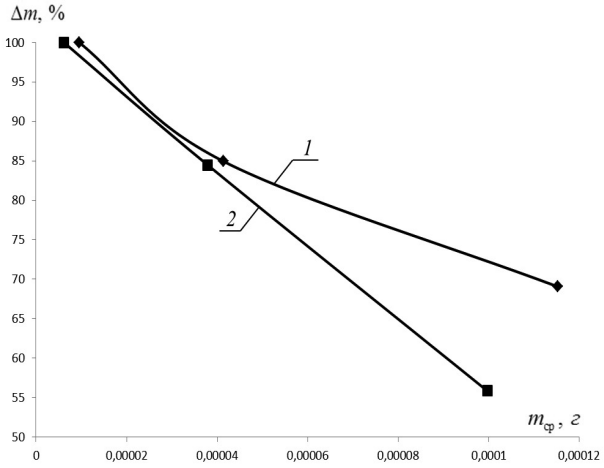


Рис.4 Зависимости параметра Δm от $m_{ср}$: *1* – рабочая жидкость № 1 (H_2O – 99,5 %, TiO_2 – 0,5 %); *2* – рабочая жидкость № 2 (H_2O – 97 %, TiO_2 – 0,5 %, NaCl – 2,5 %).

Установленные в серии опытов особенности испарения распыленных рабочих жидкостей позволяют сделать вывод о целесообразности выбора параметров распыления тушащих составов по результатам предварительного анализа возможных размеров пламени и площа-

ди очага возгорания. В этом случае возможно обеспечить полноту испарения жидкости, локализовать пламя и с минимальными излишками тушащей среды ликвидировать возгорание. Так, например, модели [5–7] и выполненные эксперименты позволили установить, что для пламени высотой 1 м целесообразно использовать распыленную воду с $R_{ср} < 0{,}25$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить несколько важных особенностей испарения типичных распыленных тушащих жидкостей при движении через пламя, заключающихся в существенной неполноте испарения, значительном замедлении движения пароводяного потока (рис. 3) и весьма интенсивном влиянии примесей соли на характеристики фазового перехода (рис. 4). Полученные результаты дополняют цикл численных исследований [5–7] и достаточно хорошо коррелируют с теоретическими следствиями этого цикла. Установленные в экспериментах особенности испарения совокупности капель целесообразно учесть при развитии моделей [5–7] в направлении численного анализа влияния характеристик пламени на условия испарения тушащего вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соковиков 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. Sokovikov V.V., Tugov A.N., Grishin V.V., Kamyshev V.N. (2008). “Automatic water fire extinguishing with using of sprayed water at power plants”, *Energetik,* no.6, pp.37-38.
2. Душкин А.Л., Карпышев А.В., Сегель М.Д. Оптимизация параметров потоков тонкораспыленных огнетушащих веществ // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 1. – С. 39–44. Dushkin A.L., Karpyshev A.V., Segel’ M.D. (2010). “Optimization of flow parameters of fine-sprayed fire extinguishing substances”, *Pozharovzryvobezopasnost*, Vol.19, no.1, pp.39–44.
3. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 11. – С. 54–57. Korol’chenko D.A., Gromovoy V.Yu., Vorogushin O.O. (2011). “Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems”, *Pozharovzryvobezopasnost,* Vol.20, no.9, pp.54–57.
4. Абдурагимов И.М. Несостоятельность идеи применения тонкораспыленной и «термоактивированной» (перегретой) воды для целей пожаротушения // Пожарное дело [интернет-журнал] – 2011. Abduragimov I.M. (2011). “The failure of idea of the sprayed and «thermoactivated» (superheated) water using for fire extinguishing”, *Pozharnoye delo [online journal]*.
5. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 5. – С. 74–78. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. (2012). “Numerical estimation of optimum sizes for water drops at the conditions of its dispersion by firefighting devices at placements”, *Pozharovzryvobezopasnost*, Vol.21, no.5, pp.74–78.
6. Стрижак П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 8. – С. 26–31. Strizhak P. A. (2012). “Numerical investigation of evaporation conditions for set of water drops at the moving after high temperature gas mixture”, *Pozharovzryvobezopasnost,* Vol.21, no.8, pp.26–31.
7. Волков Р.С., Высокоморная О.В., Стрижак П.А. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сго-

рания // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 74–79. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Strizhak P. A. (2012). "Numerical investigation of interaction conditions of the dispersed burning phlegmtizator with high temperature combustion products", *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, no.10, pp.74–79

8. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle image velocimetry. – Berlin: Springer Verlag, 1998. – 253 p.
9. Андрюшкин А.Ю., Пелех М.Т. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2012. – Т. 21, № 1. – С. 64–69. Andryushkin A. Yu., Peleh M. T. (2012). "Efficiency of the stewing fire by sprayed water", *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, Vol.21, no.1, pp.64–69.
10. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Академия Наук СССР. – Л.: Наука, 1968. – 96 с. Zaydel 'A. N. (1968). *Elementarnyye otsenki oshibok izmereniy* [Simple estimates of measurement errors], Science, Leningrad, USSR.

© Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.