

## О НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИСПАРЕНИЯ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ

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

Томский политехнический университет

E-mail: romanvolkov@tpu.ru

С использованием высокоскоростной измерительной системы проведено экспериментальное исследование макроскопических закономерностей испарения распыленных рабочих жидкостей (пресной воды и воды с примесями соли) при прохождении через пламя фиксированной высоты. Установлены интегральные характеристики испарения (размеры, масса, концентрация) капель. Определены условия распыления исследуемых рабочих жидкостей, обеспечивающие полноту их испарения.

### Ключевые слова:

Испарение, теплоперенос, пламя, капли, распыленная вода, примеси соли, поля скоростей.

### Key words:

Evaporation, heat-and-mass transfer, flame, drops, sprayed water, salt admixture, velocities field.

### Введение

Выполненные в последние годы аналитические [1–4] и численные [5–8] исследования эффективности современных технологий тушения пожаров различной степени сложности с использованием авиации показали целесообразность специального распыления флегматизаторов при сбрасывании в зону горения и подчеркнули высокую важность полноты испарения их основной массы в газовой фазе (до контакта с горящими материалами, веществами и конструкциями). Установлены характерные времена полного испарения одиночных капель, их совокупности и крупных массивов сбрасываемой воды – «водяных снарядов» [5–8]. Определено влияние группы основных факторов (размеры и скорость движения капель, расстояния между соседними каплями, температура продуктов сгорания и другие) на полноту испарения флегматизатора на примере пресной воды. Известно [3, 4], что условия движения соленой воды в зоне пламени могут значительно отличаться от условий для пресной воды. Представляет интерес проведение экспериментального исследования условий движения распыленной пресной воды и воды с примесями соли наиболее типичной концентрации через пламя фиксированной высоты, а также сопоставление с результатами численных исследований [5–8].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения распыленной рабочей жидкости при движении через высокотемпературные продукты сгорания.

### Методика проведения эксперимента

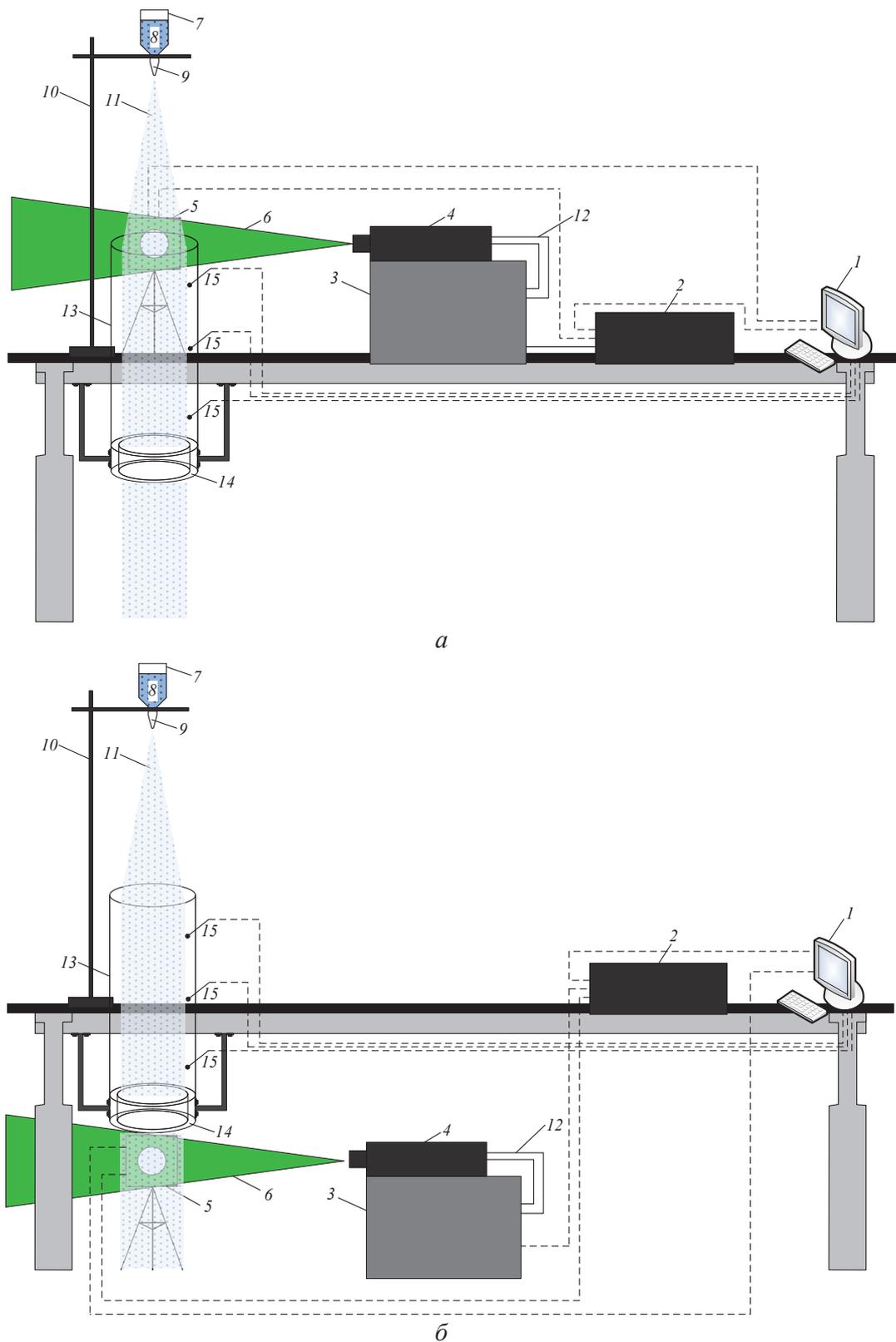
При планировании экспериментов использована схема, предусматривающая распыление рабочей жидкости (состав № 1 (%):  $H_2O$  – 97,  $TiO_2$  – 0,5,  $NaCl$  – 2,5; состав № 2 (%):  $H_2O$  – 99,5,  $TiO_2$  – 0,5) с определённой высоты в зону пламени (рис. 1). Поваренная соль ( $NaCl$ ) введена в рабочую жидкость для оценки ее влияния на полноту испарения.

Наночастицы диоксида титана ( $TiO_2$ ) выступают в роли «трассеров» [9] и необходимы для повышения четкости видеок кадров при «просвечивании» лазером траектории движения двухфазного потока с использованием PIV-системы.

В сериях экспериментов рабочие жидкости указанных составов поочередно заливались в емкость – 7 (рис. 1). Для формирования потока распыленной жидкости использовался дозатор – 9, обеспечивающий постоянство размеров и концентраций капель от эксперимента к эксперименту. Для регистрации видеопотока с изображением движущегося двухфазного потока использовалась измерительная PIV-система, состоящая из генератора лазерного излучения – 3, двойного твердотельного импульсного лазера – 4, подсвечивающего области съемки посредством «светового ножа» – 6, кросскорреляционной камеры – 5, фиксирующей изображения потока жидкости на входе и выходе цилиндрического канала – 13, синхронизатора – 2 и ПК – 1 с программным обеспечением, позволяющим «кадрировать» результаты съёмки (задержка между кадрами составляла 100 мс) и строить поля скоростей двухфазного потока в рабочей области. Особенности использования типичных диагностических PIV-систем и соответствующих измерительных методик описаны в [9].

Для регистрации температуры продуктов сгорания использовалась методика термометрических измерений [10]. Измерения температуры выполнялись хромель-копелевыми термометрами – 15 на разных отметках по высоте в зоне движения продуктов сгорания (выбраны три контрольные точки – 0,15, 0,5 и 0,85 м). Температура продуктов сгорания составила  $1070 \pm 30$  К. Важно отметить, что установленные значения температуры соответствуют средней температуре пожара [3, 4], т. е. наиболее типичным условиям, реализуемым на практике.

Скорости, линейные размеры и концентрации капель в рабочей области определялись по результатам обработки полученных видеопотоков с приме-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки (а, б – видеорегистрация капель до и после зоны пламени): 1 – ПК; 2 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 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 – поток капель рабочей жидкости; 12 – канал движения вспомогательной охлаждающей жидкости; 13 – цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 14 – полый цилиндр, во внутреннее пространство которого залита горячая жидкость; 15 – термопары

нением специализированного программного обеспечения используемой PIV-системы (рис. 1).

Цикл опытов включал в себя две серии по десять экспериментов в каждой. В первой серии экспериментов фиксировались видеокadres распыленной рабочей жидкости на входе в цилиндрический канал – 13 (высота 1 м, диаметр 0,3 м) при отсутствии пламени в последнем (рис. 1, а). Во второй серии регистрировались изображения капель после прохождения ими зоны пламени (рис. 1, б). Для формирования устойчивого пламени использовалось типичное жидкое топливо – керосин, которое заливалось в основание полого цилиндра – 14 экспериментальной установки.

После проведения серии опытов полученные видеокadres обрабатывались и строились поля скоростей распыленной жидкости в рабочей области. Обработка видеоизображений основана на кросс-корреляционном алгоритме (типичном для PIV-систем), представляющем метод быстрого преобразования Фурье с добавлением условий выполнения корреляционной теоремы [9].

При построении полей скорости определялись интегральные параметры, характеризующие движение капель распыленной рабочей жидкости через пламя. В качестве последних приняты скорость, масса, геометрические размеры капель, а также их концентрация в рабочей области. Для удобства оценки изменения перечисленных характеристик испарения капель при движении через пламя последние условно разделены на три группы: «малые» –  $0,075 < R_c < 0,175$  мм; «средние» –  $0,175 < R_c < 0,275$  мм; «большие» –  $0,275 < R_c < 0,375$  мм.

Погрешности определения размеров капель согласно методике [11] составили 0,001 мм. Случайные погрешности измерения массы капель, оцениваемые по методике [12], для рассматриваемой установки (рис. 1) не превысили 1 %. Среднеквадратичные отклонения массы в серии опытов составили меньше  $10^{-6}$  г.

### Результаты и обсуждение

Полученные при проведении опытов типичные видеокadres распыленной рабочей жидкости (например, состав № 1), а также соответствующие им поля скоростей приведены на рис. 2, 3. Установлено, что при прохождении распыленной жидкостью высокотемпературной зоны пламени (рис. 3) общая концентрация капель значительно (в несколько раз) снижается относительно начальной (рис. 2), что говорит о достаточно высокой скорости испарения последних.

По полученным видеограммам и полям скоростей оценены основные параметры испарения распыленной жидкости (состав № 1), движущейся в виде совокупности капель через пламя. Результаты приведены в таблице (группа № 1 – «малые» капли, группа № 2 – «средние» капли, группа № 3 – «большие» капли).

В результате серии опытов установлено, что при прохождении капель с характерными разме-

рами  $0,075 < R_c < 0,375$  мм пламени высотой 1 м масса «больших» капель  $m_{cp}$  уменьшается на 56 % (таблица). Масса «средних» капель  $m_{cp}$  уменьшается на 84 %. «Малые» капли испаряются полностью ( $m_{cp} \rightarrow 0$  и  $R_{cp} \rightarrow 0$ ). Происходит существенное изменение внутренней структуры двухфазного парожидкостного потока при движении через высокотемпературные газы. Так, например, средняя относительная концентрация капель на выходе, отнесенных к группе «больших», существенно (в 5,5 раз) больше начальной (таблица), что говорит о значительном уменьшении доли «средних» и «малых» капель в рабочей области после пламени.

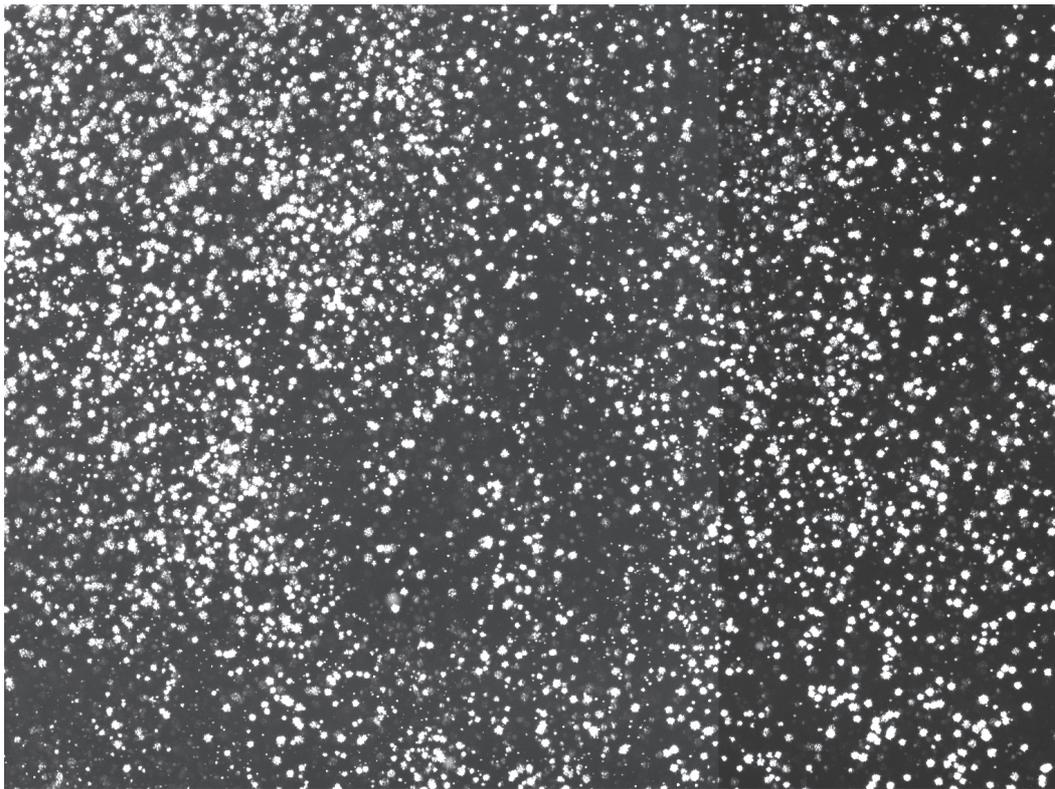
**Таблица.** Средние значения параметров испарения капель распыленной рабочей жидкости (состав № 1)

Наименование параметра	№ группы	На входе в канал	На выходе из канала
$R_{cp}$ , мм	1	0,112	0
	2	0,207	0,111
	3	0,285	0,217
$m_{cp}$ , г	1	$0,616 \cdot 10^{-5}$	0
	2	$3,794 \cdot 10^{-5}$	$0,593 \cdot 10^{-5}$
	3	$9,968 \cdot 10^{-5}$	$4,403 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_{cp}$ , %	1	39,20	0
	2	48,27	31,54
	3	12,53	68,46
$v_{cp}$ , м/с	1	0,802	0,357
	2		0,478
	3		0,710

$R_{cp}$  – средний радиус, мм;  $m_{cp}$  – средняя масса, г;  $\alpha_{cp}$  – средняя относительная концентрация в рабочей области, %;  $v_{cp}$  – средняя скорость, м/с.

Также эксперименты показали, что некоторая доля (около 12...16 %) «малых» и «средних» капель, движущихся во фронте потока, уносится с уходящими дымовыми газами на входе в канал – 13. Это можно объяснить как высокими температурами пламени, так и относительно высокими скоростями восходящих продуктов сгорания (до 0,3 м/с). Этот фактор очень важен и его целесообразно учитывать при доработке моделей тепломассопереноса [5–8].

Анализ таблицы показывает, что скорости капель на выходе из области горения  $v_{cp}$  снижаются в среднем на 0,35 м/с относительно скоростей на входе в канал. Также установлено, что средняя скорость потока рабочей жидкости  $v_{cp}$  существенно (52 %) меньше скоростей на выходе канала без пламени. Это обусловлено как движением продуктов сгорания, так и интенсивным фазовым переходом при парообразовании. Полученный результат хорошо коррелирует с зависимостями, полученными при проведении численного моделирования [5–8] для скоростей и характерных времен существования водяных капель. Однако, абсолютные значения  $v_{cp}$  в теоретических работах [5–8] в несколько раз превышают скорости, установленные в серии опытов (таблица). Это можно объяснить тем, что при моделировании [5–8] высокотемпературные продукты сгорания считались неподвижными



*a*

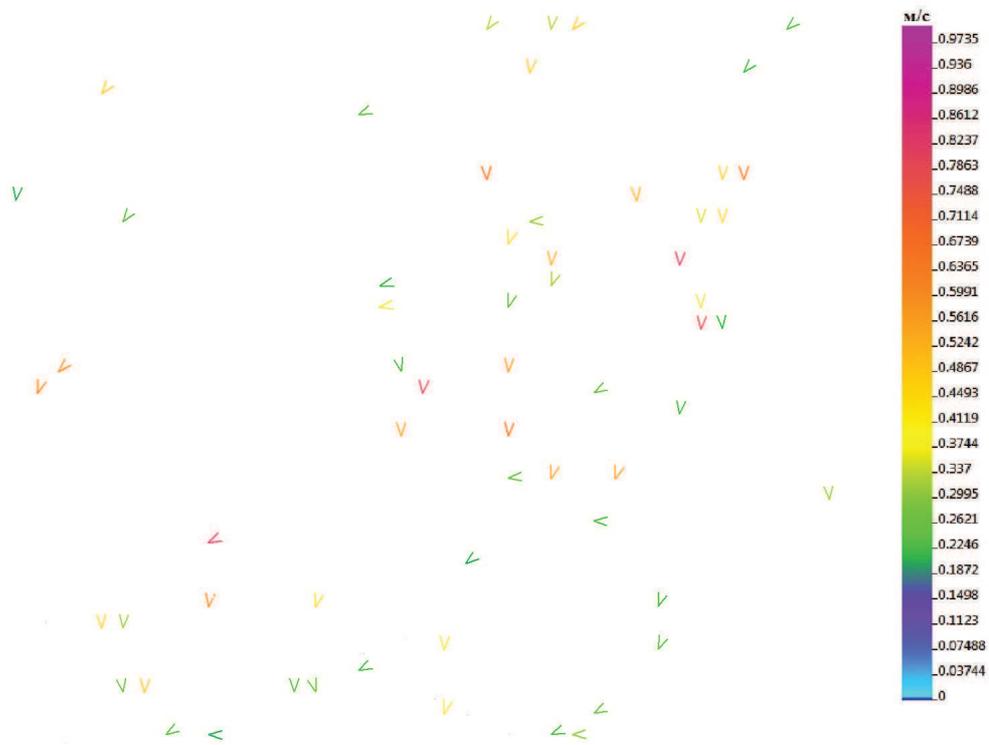


*б*

**Рис. 2.** Видеogramма (а) и поле скорости (б) капель жидкости на входе в канал



*a*



*б*

**Рис. 3.** Видеogramма (а) и поле скорости (б) капля жидкости после пламени

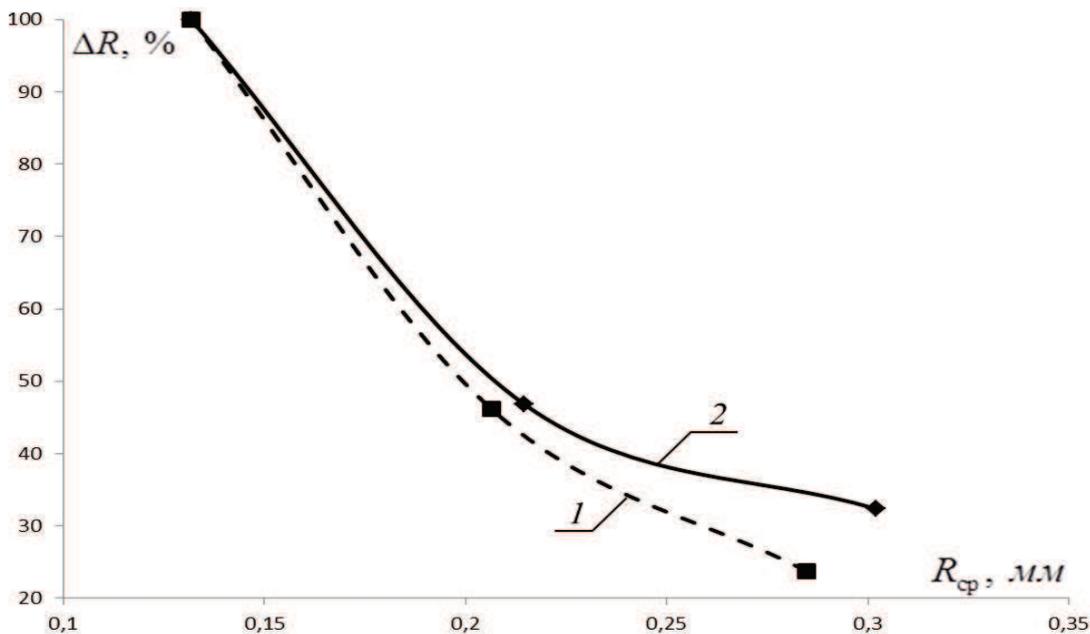


Рис. 4. Зависимости параметра  $\Delta R$  от  $R_{cp}$ : 1 – рабочая жидкость № 1 (%) ( $H_2O$  – 97,  $TiO_2$  – 0,5,  $NaCl$  – 2,5); 2 – рабочая жидкость

№ 2 (%) ( $H_2O$  – 99,5,  $TiO_2$  – 0,5);  $R_{cp}$  – средний радиус капель на входе в пламя;  $\Delta R = \frac{R_{cp,вх.} - R_{cp,вых.}}{R_{cp,вх.}} \cdot 100\%$  – параметр, характеризующий уменьшение размера капли после прохождения пламени

относительно капель распыленной жидкости.

По экспериментальным значениям, полученным в серии опытов, построены зависимости параметра  $\Delta R$  от среднего радиуса капли в потоке  $R_{cp}$ , иллюстрирующие характерные отличия интенсивности испарения исследуемых рабочих жидкостей (состав № 1 и 2).

Анализ рис. 4 показывает, что при среднем радиусе капель  $R_{cp} < 0,2$  мм отклонения параметра  $\Delta R$  для исследуемых составов не превышают 4 %. При увеличении средних размеров капель  $R_{cp}$  влияние примесей  $NaCl$  на интенсивность испарения усиливается. Так, например, при  $R_{cp} = 0,25$  мм значение параметра  $\Delta R$  для рабочей жидкости № 1 составляет 32 %, а для рабочей жидкости № 2 – 38 %. При  $R_{cp} = 0,28$  мм те же параметры равны 25 и 35 % соответственно.

Установленную 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. Этот результат хорошо согласуется с аналитическими зависимостями [3, 4]. При уменьшении размеров капель относительно  $R_{cp} = 0,15$  мм 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 раз-

меров жидкости без и с примесями  $NaCl$  за практически равные времена. Влияние примесей  $NaCl$  несколько ослабляется и характерные значения  $\Delta R$  для исследуемых рабочих жидкостей становятся сопоставимыми (рис. 4). Выявленный эффект представляет интерес для дальнейшего численного исследования с целью установления пределов применимости теоретических заключений [5–8] в направлении специализированного распыления соленой и пресной воды с различными примесями (ретродантами).

#### Выводы

1. Установлено, что доля испарившейся рабочей жидкости для типичных по размерам капель исследуемых распыленных составов не превышает 60 %. Лишь при достижении  $R_{cp}$  значений, соответствующих 0,1...0,2 мм, капли в серии экспериментов при прохождении пламени высотой 1 м испарялись практически полностью. Эти значения  $R_{cp}$  можно рекомендовать к использованию в качестве максимальных для обеспечения полноты испарения распыляемой жидкости.
2. Выполненные опыты позволили выявить важную особенность, связанную с существенным замедлением движения капель распыленной жидкости в зоне пламени (таблица). Этот результат можно объяснить действием соответствующих сил сопротивления, вызванных движением восходящих продуктов сгорания, фазовым переходом на поверхности капель и други-

- ми факторами. Установленные эффекты следует учесть при доработке моделей теплопереноса [5–8], в которых движение высокотемпературных газов не исследовалось (в первом приближении принималось условие  $v_{\text{пр}}=0$  м/с).
3. Показано, что рабочая жидкость с примесями NaCl существенно медленнее испаряется по сравнению с пресной водой. Этот результат хорошо согласуется с [3, 4]. Однако также установлено, что при достижении некоторых значений  $R_{\text{ср}}$  (менее 0,15 мм) интенсивности испаре-

ния капель рассматриваемых рабочих жидкостей (с NaCl и без примесей солей) сопоставимы. Этот результат иллюстрирует возможность некоторого обобщения результатов численных исследований [5–8], выполненных с пресной водой, при разработке соответствующих рекомендаций тушения лесных пожаров водой с определенным содержанием солей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-620.2012.8).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сокоиков 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.
2. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. – 2011. – Т. 2. – № 1. – С. 331–335.
3. Андрушкин А.Ю., Пелех М.Т. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2012. – Т. 21. – № 1. – С. 64–69.
4. Копылов Н.П., Чибисов А.Л., Душкин А.Л., Кудрявцев Е.А. Изучение закономерностей тушения тонкораспыленной водой модельных очагов пожара // Пожарная безопасность. – 2008. – № 4. – С. 45–58.
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.
6. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Heat and Mass Transfer in the Process of Movement of Water Drops in a High-temperature Gas Medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – V. 86. – № 1. – P. 62–68.
7. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние формы капли воды на результаты математического моделирования ее испарения при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 6. – С. 254–261.
8. Высокоморная О.В., Марков А.О., Назаров М.Н., Стрижак П.А., Янов С.Р. Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «водяного снаряда» // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 24–31.
9. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle image velocimetry. – Berlin: Springer Verlag, 1998. – 253 p.
10. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 391 с.
11. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
12. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Академия Наук СССР. – Л.: Наука, 1968. – 96 с.

*Поступила 26.06.2013 г.*