

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПАРЕНИЯ ПРЕСНОЙ И СОЛЁНОЙ ВОДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ПЛАМЯ

В статье приведены результаты исследований влияния солей в воде на её свойства при тушении пожаров. Показано, что при малых размерах капель воды присутствие солей незначительно влияет на интенсивность парообразования в пламенной зоне горения и, соответственно, на эффективность тушения пожаров.

*Ключевые слова:* пожар, пламя, тушение, распылённая вода, соль, испарение.

Наиболее распространённым способом тушения крупных лесных пожаров с применением авиации является локальный сброс воды или её смеси с различными добавками в зону горения [1, 2]. При этом, как правило, забор воды происходит в водоёмах (озёра, каналы, реки, моря), наиболее близко располагающихся к очагу пожара или важным объектам (населённым пунктам, заповедным зонам и другим). Как следствие, компонентный состав используемой при тушении лесных пожаров воды не контролируется. Известно, что наличие солей в воде приводит к существенному увеличению времени прогрева её приповерхностного слоя и менее интенсивному испарению по сравнению с пресной водой [3]. Представляет интерес сравнительная оценка интегральных характеристик фазовых превращений таких жидкостей в пламенной зоне горения (очаге пожара).

Теоретические [4, 5] и экспериментальные [6, 7] исследования показали, что локальный сброс воды в зону горения приводит к полезному использованию лишь малой (до 5 %) доли жидкости в процессе тушения пожаров. Установ-

лено, что при специальном распылении жидкости до достижения размеров капель от нескольких десятков до сотен микрон возможно эффективное воздействие воды на пламя высотой от 1 до 10 метров. Поэтому целесообразно исследовать влияние присутствия солей в воде на интегральные характеристики испарения в зоне пламени как распылённой жидкости, так и её некоторой нераспылённой массы (например, одиночных достаточно больших по размерам капель).

Важно отметить, что создание моделей тепломассопереноса для изучения движения в зоне пламени потока распылённой жидкости, одиночных капель и их некоторой малой совокупности довольно сложно [4, 5]. Наиболее рациональным способом решения задачи является проведение экспериментальных исследований с применением высокоскоростных измерительных систем диагностики двухфазных потоков и соответствующих методов обработки информации, например [6, 7].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование и сравнительный анализ макроскопических закономерностей испарения воды с различным содержанием солей при её движении через пламя. При проведении исследований использовалась установка [6, 7], включающая кросскорреляционную видеокамеру, двойной импульсный твердотельный лазер, синхронизирующий процессор и другие элементы, условно представленные на *рисунке 1*.

По аналогии с экспериментами [6, 7], в качестве рабочей жидкости в опытах

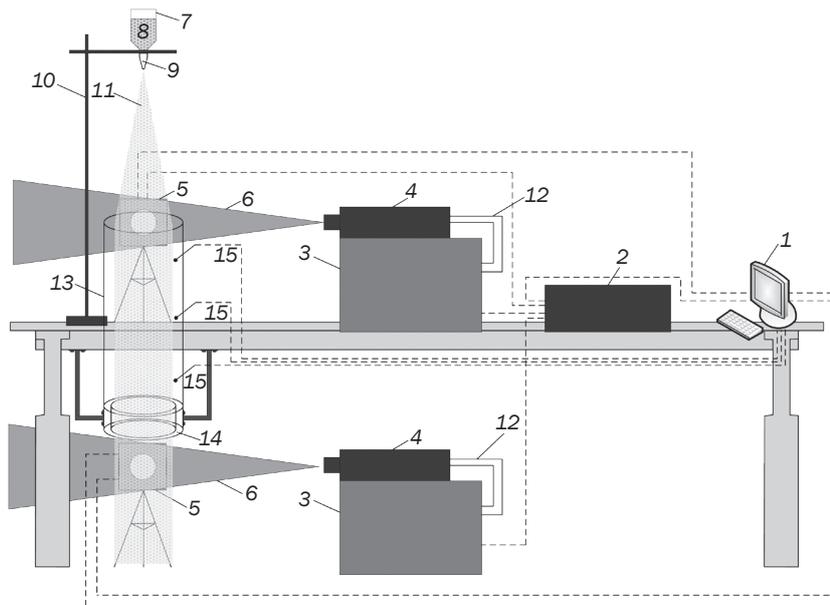


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки:

- 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 – распылитель; 10 – штатив; 11 – капли рабочей жидкости;  
 12 – канал движения охлаждающей жидкости лазера;  
 13 – цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала;  
 14 – полый цилиндр, во внутреннее пространство которого залита горючая жидкость; 15 – термопары

применялась вода со специальными включениями – «трассерами», представляющими примесь (0,5 %) нанопорошка диоксида титана для повышения качества видеogramм, получаемых кросскорреляционной камерой. Частицы  $TiO_2$  выбраны в качестве «трассеров», так как не растворяются в воде [7]. В отличие от экспериментов [6, 7], в воду также добавлялись наночастицы  $NaCl$  ( $\gamma = 0-10\%$ ) для исследования влияния солей на интегральные характеристики испарения.

Для каждого значения  $\gamma$  цикл опытов включал две серии по десять экспериментов. В первой серии экспериментов фиксировались видеок cadры входа распылённой жидкости в цилиндрический канал 13 (высота 1 м, диаметр 0,3 м). Во второй серии были получены изображения капель после прохождения ими зоны высокотемпературных продуктов сгорания (пламени). Основные этапы опытов аналогичны описанным в [6, 7].

Также проводились эксперименты с одиночными достаточно большими (условный радиус до 4 мм) каплями – локально сброшенной водой. При этом в установке вместо распылителя 9 применялся дозатор.

Для формирования устойчивого пламени использовалось типичное жидкое топливо со стабильными свойствами – керосин, которое заливалось в основание полого цилиндра 14 экспериментальной установки и поджигалось перед проведением опытов. При этом в каждом опыте с применением хромель-копелевых термопар контролировалась температура продуктов сгорания  $T_f$  в цилиндрическом канале 13 (в среднем она составила  $1150 \pm 30$  K).

При обработке видеок cadров с изображениями капель распылённой жидкости аналогично [6, 7] применялись методы цифровой «трассерной» визуализации PIV (Particle Image Velocimetry)

и IPI (Interferometric Particle Imaging) [8]. Измерялись мгновенные поля скоростей «трассирующих» частиц в двухфазном потоке и характерные размеры капель жидкости.

В потоке распылённой жидкости размеры капель изменялись в диапазоне  $0,04 \leq R \leq 0,4$  мм. При обработке видеogramм для оценки изменения интегральных характеристик испарения капель последние условно разделены по размерам на пять групп:

- 1)  $0,04 \leq R \leq 0,09$  мм;
- 2)  $0,09 < R \leq 0,16$  мм;
- 3)  $0,16 < R \leq 0,23$  мм;
- 4)  $0,23 < R \leq 0,3$  мм;
- 5)  $0,3 < R \leq 0,4$  мм.

Процедуры обработки видеogramм описаны в [6, 7].

Погрешности измерения температуры  $T_f$  при использовании методики термopарных измерений не превысили 2,5 % [9]. Погрешности определения размеров капель, согласно методикам [10], составили 0,001 мм. Погрешности измерения скоростей капель не превысили 2 % [8].

В результате серии экспериментов (при варьировании доли солей в воде  $\gamma$  в диапазоне от 0 до 10 %) получены видеogramмы с изображениями капель распылённой жидкости на входе и выходе из пламенной зоны горения, а также соответствующие им поля скоростей «трассирующих» частиц в области движения двухфазного парожидкостного потока. В качестве примера на *рисунке 2* приведены типичные видеogramмы и поля скоростей «трассеров» при  $\gamma = 2,5$  %.

В процессе обработке видеogramм аналогично экспериментам [6, 7] вычислялись значения характерных размеров капель  $R_m$ , их концентрации  $\alpha_m$  в зоне высокотемпературных газов, а также скоростей движения  $v_m$ . В настоящей работе основное влияние уделено отличиям полноты испарения солёных ( $\gamma$  до 10 %) и пресных ( $\gamma = 0$  %) вод в зоне пламени. Для этих целей введён в рассмотрение интегральный параметр  $\Delta R$ , характери-

зующий процентное изменение размеров капель при прохождении ими пламени относительно зарегистрированных на входе в высокотемпературную газовую среду (канал 13 экспериментальной установки).

На *рисунке 3* приведены зависимости параметра  $\Delta R$  от среднего начального характерного размера  $R_m$  для выделенных согласно экспериментальной методике групп капель воды при варьировании параметра  $\gamma$  в типичном для практики тушения пожаров диапазоне.

Видно, что при  $R_m < 0,4$  мм влияние солей на интегральные характеристики парообразования (как следствие, убыли массы жидкости) несущественно (отличие параметра  $\Delta R$  при изменении  $\gamma$  от 0 до 10 % не превышает 6 %). Для кривых 1–4, приведённых на *рисунке 3*, получены следующие аппроксимационные выражения:

$$\Delta R = 7,228 \cdot R_m^{-1,032} \text{ при } \gamma = 0 \text{ \%}; \quad (1)$$

$$\Delta R = 5,742 \cdot R_m^{-1,061} \text{ при } \gamma = 2,5 \text{ \%}; \quad (2)$$

$$\Delta R = 4,768 \cdot R_m^{-1,145} \text{ при } \gamma = 5 \text{ \%}; \quad (3)$$

$$\Delta R = 4,659 \cdot R_m^{-1,155} \text{ при } \gamma = 10 \text{ \%}. \quad (4)$$

Можно сделать вывод не только о малых отклонениях кривых 1–4, но и о незначительных отличиях коэффициентов аппроксимационных выражений (1)–(4).

Для анализа влияния примесей солей на интегральные характеристики испарения нераспылённой воды в зоне пламени проведены эксперименты с движением одиночных достаточно больших (на порядок превышающих размеры частиц распылённого потока – до  $R_m = 4$  мм) капель (см. *рис. 2*). Установлено, что, например, при  $R_m = 4$  мм значения параметра  $\Delta R$  при изменении  $\gamma$  от 0 до 10 % отличаются на 18 % (влияние  $\gamma$  в несколько раз существеннее, в отличие от потока распылённой жидкости).

Выявленные закономерности процессов испарения распылённой и нераспылённой

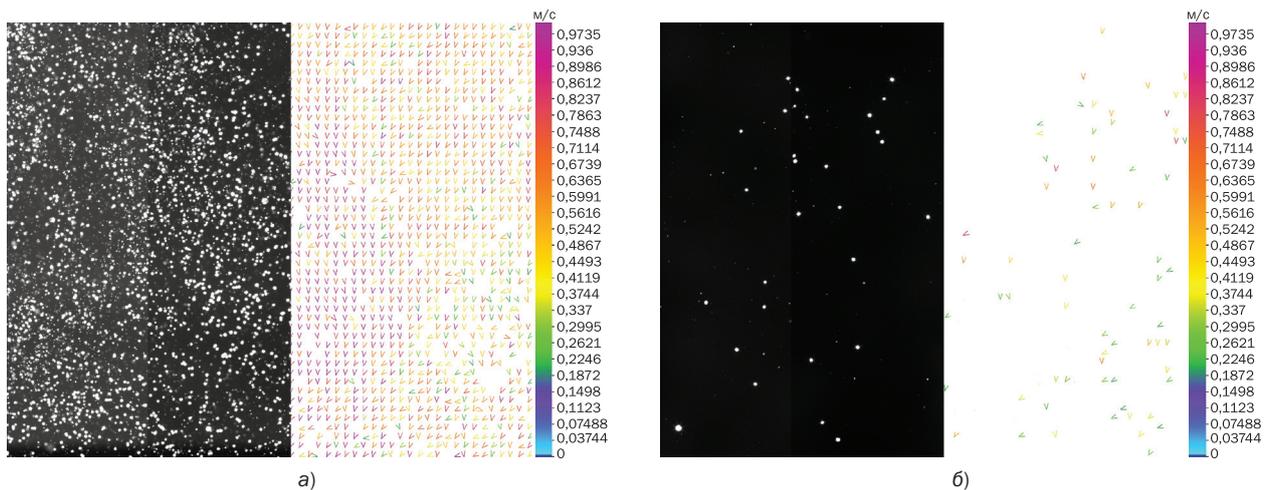


Рисунок 2. Видеограммы совокупности капель распылённой жидкости и поля скоростей «трассирующих» частиц на входе (а) и выходе (б) из зоны пламени при  $\gamma = 2,5\%$

воды с типичным содержанием солей можно объяснить значительным отличием теплофизических характеристик (в первую очередь, теплоёмкости и теплопроводности) водяных капель и капель воды с включениями NaCl. При уменьшении размера капли солёной воды снижается количество частиц NaCl в капле. В результате уменьшается теплоёмкость капли как системы «H<sub>2</sub>O + NaCl». Меньше энергии требуется для прогрева приповерхностного слоя этой системы и интенсификации фазового перехода. Поэтому интегральные характеристики парообразования близки распылённой пресной ( $\gamma = 0\%$ ) воде (см. рис. 3). При локальном сбрасывании (на примере одиночных достаточно крупных капель) влияние частиц NaCl становится значительным. Увеличивается энергия, затрачиваемая на прогрев системы «H<sub>2</sub>O + NaCl» и фазового перехода, – менее интенсивно протекает парообразование при прочих адекватных условиях.

Важно отметить, что в экспериментах для капель распылённой жидкости с начальным размером менее 0,05 мм на выходе из зоны пламени зарегистрированы лишь «трассеры» с частицами NaCl (рис. 2). Установленная особенность

показывает, что при измельчении капель солёной воды, несмотря на достаточно высокие значения  $\gamma$ , можно существенно интенсифицировать парообразование в зоне пламени (очаге пожара). Это, в свою очередь, приводит к повышению коэффициента полезного использования жидкости при тушении различных возгораний и пожаров.

Выявленные макроскопические закономерности позволяют сделать вывод о том, что при локальном сбросе (без специального распыления) массивных «водяных снарядов» условия тушения пожаров солёной и пресной водой существенно отличаются (определяющее значение имеет выбор водоема). Распыление «водяных снарядов» в зоне горения позволяет уменьшить влияние рассматриваемого фактора.

На основании результатов выполненных экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что интенсивность парообразования в пламенной зоне горения может быть сопоставимой для пресных и солёных вод при специальном распылении (измельчении капель до  $R_m < 0,4$  мм). При локальном сбросе солёная вода существенно меньше испаряется в зоне пламени и, как

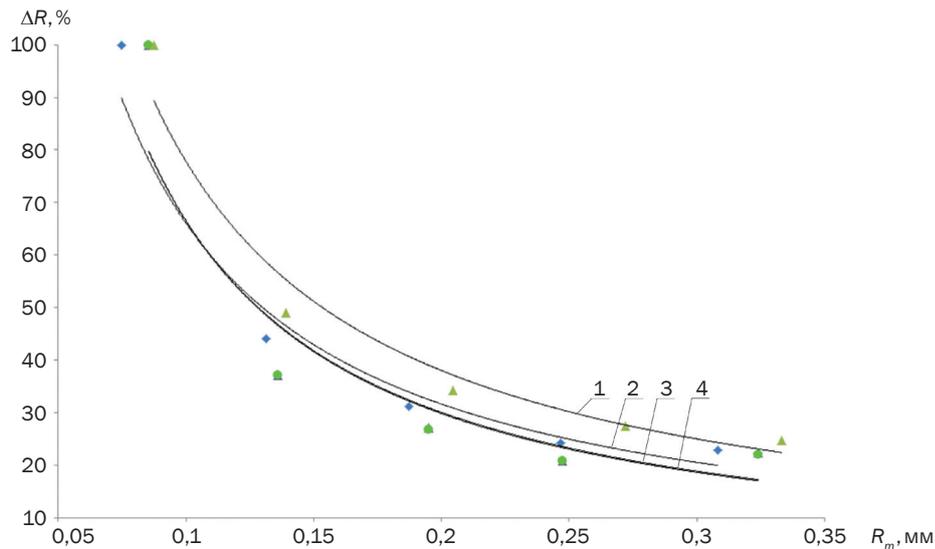


Рисунок 3. Зависимости параметра  $\Delta R$  от начального размера капель  $R_m$ :

1) при  $\gamma = 0\%$ ; 2) при  $\gamma = 2,5\%$ ; 3) при  $\gamma = 5\%$ ; 4) при  $\gamma = 10\%$ ;

▲, ●, ◆, ▲ – экспериментальные значения

следствие, большая масса жидкости неэффективно используется при тушении пожара. Для снижения этой массы её целесообразно распылить в зоне горения. Как следствие, нет необходимости в выборе водоёма, забора большого (часто избыточного) количества жидкости воздуш-

ными судами, её специальной подготовки и других сопутствующих затратных операций при тушении лесных пожаров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 13–08–90703).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хасанов И. Р., Москвиллин Е. А. Авиационные методы тушения крупных лесных пожаров // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков: Материалы XV науч.-практ. конф. – Ч. 1. – М.: ВНИИПО, 1999. – С. 300–301.
2. Горшков В. С., Москвиллин Е. А., Хасанов И. Р. Оценка параметров тушения лесных пожаров авиационными средствами // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников: Сборник тезисов науч.-практ. конф. – М.: ИИЦ ВНИИ ГОЧС, 2001. – С. 34–35.
3. Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977.
4. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях её распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 5. – С. 74–78.
5. Стрижак П. А. Влияние распределения капель в «водяном снаряде» на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инженерно-физический журнал. – 2013. – № 4. – С. 839–848.
6. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспылённой воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Бутлеровские сообщения. – 2013. – № 9. – С. 38–46.
7. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. О некоторых физических закономерностях испарения распылённой воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – № 6. – С. 45–52.
8. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle image velocimetry. – Berlin: Springer Verlag, 1998.
9. Полежаев Ю. В., Юрьевич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976.
10. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972.

Volkov R., Kuznetsov G., Strizhak P.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INTEGRATED EVAPORATION CHARACTERISTICS FOR FRESH AND SALTY WATER AT MOVING THROUGH THE FLAME

**Purpose.** Currently water usage at firefighting of varying complexity (especially large forest fires) is the most widespread approach of fire protection. At that as a rule the water drawoff is carried out either from special reservoirs or from reservoirs neighboring to fire sources (lakes, channels, seas) and practically no attention is paid to the liquid component composition, in particular, to its salinity. At the same time salt admixtures in water are known to inhibit the heat process and the following liquid evaporation. In the paper experimental investigation results of integral characteristics of fresh and salt water evaporation in the flame zone are given.

**Methods.** Experimental investigations were conducted by means of modern highly accurate registry equipment operated on the base of optical methods of digital tracer visualization “Practicle Image Velocimetry” and “Interferometric Particle Imaging”. Well-known data processing iteration algorithms were used.

**Findings.** Comparison of fresh and salt water evaporation completeness during the motion

through high-temperature combustion products was conducted.

Ranges of salt admixtures influence on water droplet evaporation velocity were defined. It was demonstrated that this effect increases with the initial droplet size rise. Approximate data that allow to make a forecast of salt admixtures influence on sprayed water droplet evaporation completeness were received.

**Research application field.** Received data should be taken into account at choosing methods of water discharge to the fire area and reservoirs as well during the extinction process.

**Conclusions.** The specialized water spraying is reasonable for decreasing the influence of salt admixtures in the extinguishing liquid on its evaporation process and as a result for increasing rational liquid utilization coefficient.

*Key words:* fire, flame, extinction, sprayed water, salt, evaporation.

### REFERENCES

1. Khasanov I. R., Moskvilin E. A., *Materialy XV nauchno-prakticheskoi konferentsii “Problemy gorenii i tusheniia pozharov na rubezhe vekov”* (Proceedings of the XV<sup>th</sup> Scientific-Practical Conference “Problems Burning and Extinguishing Fires at the Turn of the Century”), Moscow, 1999, pp. 300–301.
2. Gorshkov B. C., Moskvilin E. A., Khasanov I. R., *Sbornik tezisov nauchno-prakticheskoi konferentsii “Problemy prognozirovaniia chrezvychainykh situatsii i ikh istochnikov”* (Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Problems of Forecasting Emergency Situations and Their Sources”), Moscow, 2001, pp. 34–35.
3. Isachenko V. P., *Teploobmen pri kondensatsii* (Heat exchange at condensation), Moscow, 1977.
4. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A., *Pozharovzryvobezopasnost’* (Fire and Explosion Safety), 2012, № 5, pp. 74–78.
5. Strizhak P. A., *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* (Engineering and Physical Journal), 2013, № 4, pp. 839–848.
6. Volkov R. S., Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A., *Butlerovskie soobshcheniia* (Butlerov Communications), 2013, № 9, pp. 38–46.
7. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A., *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* (Bulletin of the Tomsk Polytechnic University), 2013, № 6, pp. 45–52.
8. Raffel M., Willert C., Kompenhans J., *Particle image velocimetry*. Berlin, Springer Verlag, 1998.
9. Polezhaev Yu. V., Yurievich F. B. *Teplovaia zashchita* (Thermal protection), Moscow, 1976.
10. Shenk Kh. *Teoriia inzhenerenogo eksperimenta* (Theory of the engineering experiment), Moscow, 1972.

ROMAN VOLKOV	National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of Power Engineering, Tomsk, Russia
GENI KUZNETSOV	Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of Power Engineering, Tomsk, Russia
PAVEL STRIZHAK	Doctor of Physical and Mathematical Sciences National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of Power Engineering, Tomsk, Russia