

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДЫ С ПЛАМЕНЕМ

Ю. В. Алеханов², М. В. Блинецов¹, Ю. А. Власов¹, С. И. Герасимов¹,
В. И. Дудин¹, А. Е. Левушов^{1,2}, А. И. Логвинов^{1,2}, С. А. Ломтев²,
В. В. Мармышев¹, Е. Е. Мешков^{1,2}, Ю. К. Семенов¹, С. В. Цыкин¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

²Саровский государственный физико-технический институт, 607188 Саров, meshkov@sarfti.sarov.ru

Описан лабораторный метод исследования гашения пламени облаком диспергированной воды, создаваемым электрическим взрывом проволоочки в цилиндрической тонкостенной стеклянной ампуле, заполненной водой. Приведены результаты экспериментов. Представлены также результаты численного моделирования выполненных экспериментов.

Ключевые слова: диспергированная вода, пламя, тушение пожаров, лабораторные эксперименты.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интенсивно развивается технология тушения пожаров при помощи тонкораспыленной или диспергированной воды (размер капель 100 мкм и менее) [1–8]. Применение аэрозвеси воды при тушении пламени обеспечивает эффективность использования воды до 100 % (при традиционных методах — до 5 %) [2]. Разрабатываются способы создания газок капельной струи непрерывного действия [3] и одновременно импульсные методы создания облаков диспергированных сред [2, 4, 5]. На основе применения импульсных методов предлагаются различные способы тушения крупномасштабных пожаров, в том числе лесных и степных [6–8]. В импульсных методах для создания облака аэрозвеси может использоваться не только вода, но и широкий спектр сыпучих, порошковых, жидких, вязких составов и композиций [4, 5], но по многим причинам наиболее широко используется вода. Отработка и оптимизация методов создания аэрозвеси воды и их применения для тушения пламени на натуральных устройствах требуют достаточно больших затрат. В связи с этим представляет интерес разработка лабораторных методов исследования физических процессов тушения пламени диспергированной водой [9]. Результаты экспериментов с применением данных методов могут стать основой для разра-

ботки расчетно-теоретических моделей тушения пожаров.

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для создания облака диспергированной воды использовался электровзрыв цилиндрической тонкостенной стеклянной ампулы с наружным диаметром 16 мм ($V = 1.6 \text{ см}^3$), заполненной водой (рис. 1). По торцам ампулы устанавливались пластинки из жести. Тонкая проволока, расположенная по оси ампулы, взрывалась под действием импульса тока от конденсаторной батареи емкостью 0.25 мкФ, заряженной до 15 кВ.

На рис. 2 приведены кадры фотохронограммы (снятой скоростной камерой СФР) раз-

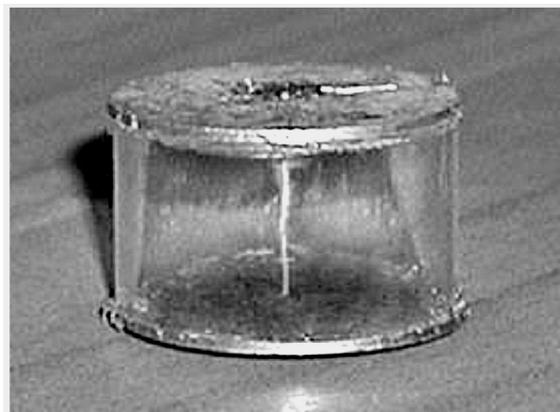


Рис. 1. Фотография ампулы с водой

Работа выполнена в рамках научно-инновационного сотрудничества Министерства образования РФ и Минобрнауки РФ (проекты 2.06-26 и 3.06-19).

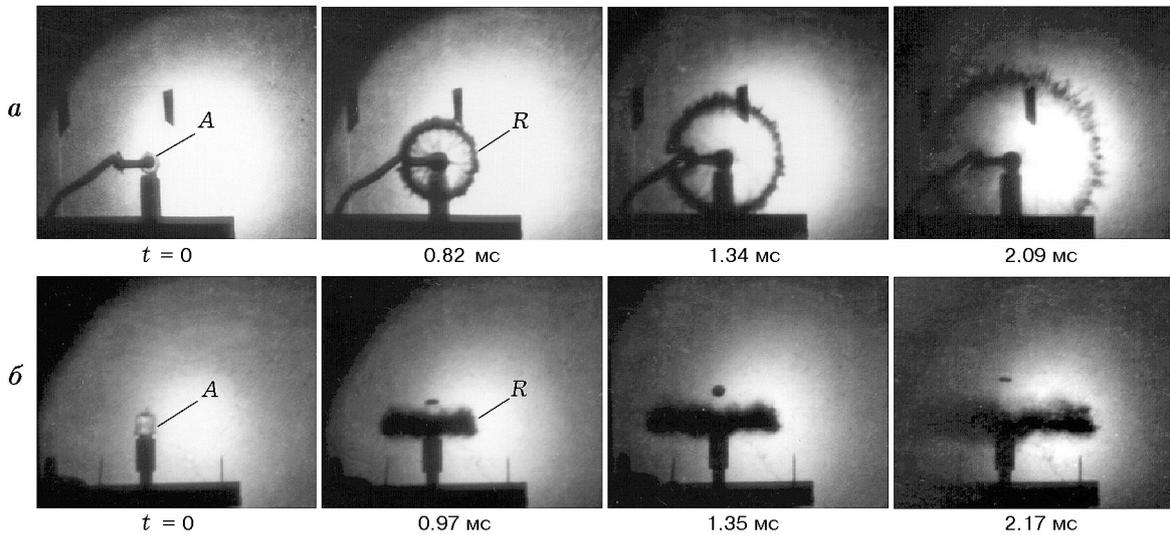


Рис. 2. Кадры фотохронограммы разлета кольца диспергированной воды (R) при электровзрыве цилиндрической ампулы (A) с водой:

a — съемка в направлении оси ампулы, b — съемка в направлении, нормальном к оси ампулы; время отсчитывается от момента взрыва ампулы

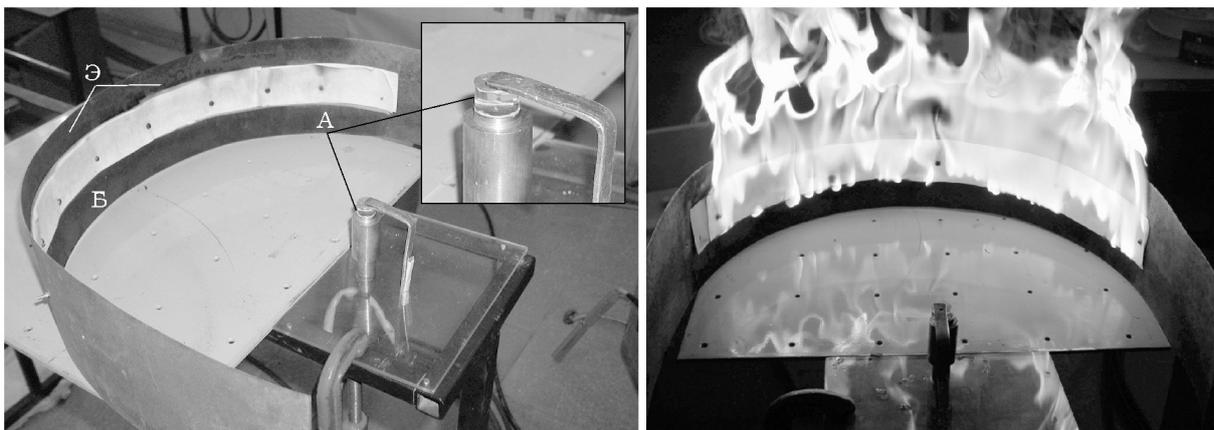


Рис. 3. Постановка эксперимента по тушению пламени (a) и пламя горячей бумаги с ацетоном (b): взрывающаяся ампула (A) (показана также на вставке в увеличенном масштабе) с водой устанавливается приблизительно в центре изогнутого в форме полуцилиндра металлического экрана (Э), на котором закреплена полоска бумаги (Б), смоченная ацетоном

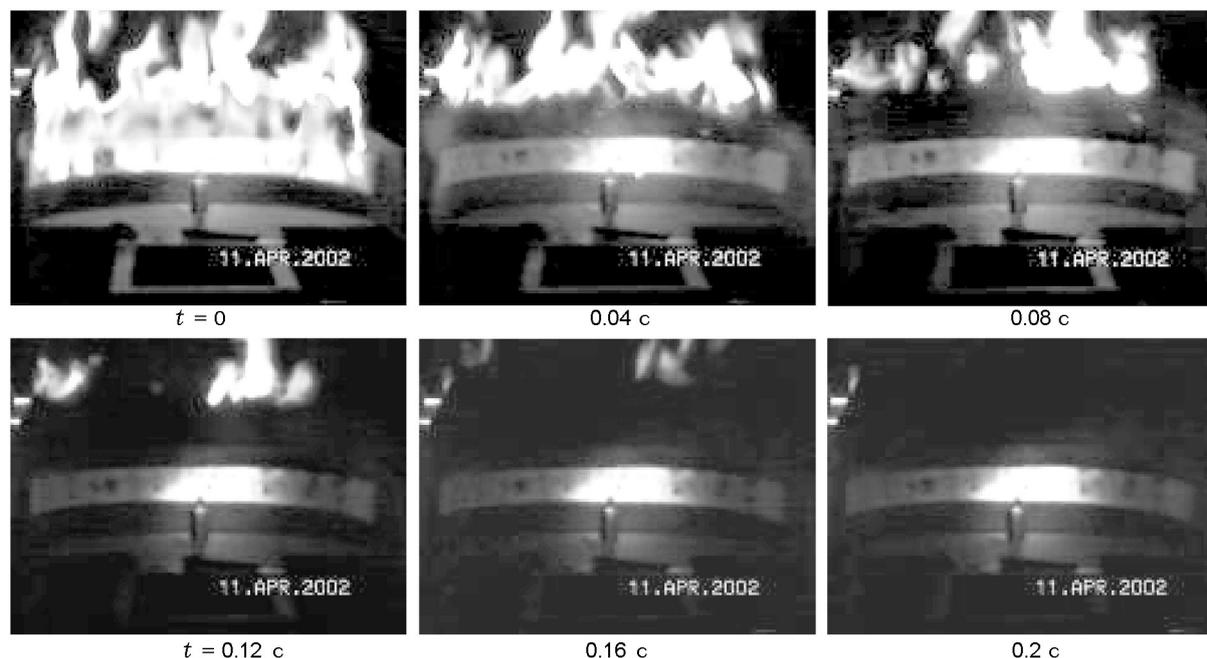


Рис. 4. Гашение пламени диспергированной водой:

в области, куда попала вода, пламя погасло за время $t < 0.04$ с, остальная часть пламени догорает в течение 0.16 с и постепенно погасает

лета воды после взрыва ампулы. В этих опытах регистрация течения осуществлялась как в направлении оси ампулы (рис. 2, а), так и в нормальном к ней направлении (рис. 2, б). Из кинограмм следует, что после взрыва ампулы диспергированная вода разлетается в форме кольца. Во всех случаях в процессе разлета кольцо слабо расширяется в осевом направлении. Поверхность кольца сильно возмущена, и это возмущение растет со временем. При $t \approx 2$ мс развитие возмущений приводит к распаду кольца на отдельные группы. Это может быть связано с развитием неустойчивости Рэлея — Тейлора [10].

По данным R - t -диаграммы начальная скорость разлета кольца v_0 составляет 64 м/с. Поскольку вода разлетается в виде тонкого кольца и скорость всех элементов кольца практически одинакова, то можно оценить кинетическую энергию ($E_{kin} \approx mv_0^2/2$) разлетающегося облака аэрозвеси ($E_{kin} \approx 3.3$ Дж). Соответственно плотность энергии можно оценить на основе соотношения $e = E_{kin}/m \approx v_0^2/2$ ($e \approx 2$ Дж/г).

В одном из опытов был произведен подрыв ампулы, заполненной чернилами. По отпечаткам на бумаге, располагаемой на разных рас-

стояниях от ампулы, найдено, что разлетающееся кольцо состоит из капель размером менее 250 мкм.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДЫ С ПЛАМЕНЕМ

На рис. 3 приведена постановка, а на рис. 4 — снятые обычной видеокамерой (с частотой 25 кадр/с) кадры эксперимента по взаимодействию разлетающегося облака диспергированной воды с пламенем. Ампула с водой находилась на расстоянии $R \approx 21$ см от металлического экрана, изогнутого в форме полуцилиндра. На внутреннюю поверхность экрана помещалась полоска картона с укрепленной на ней полоской фильтровальной бумаги ($\approx 42 \times 5$ см). Бумага смачивалась ацетоном (≈ 2 мл), поджигалась, и через несколько секунд производился подрыв ампулы.

В той области пламени, куда попадала диспергированная вода, реакция горения прекращалась полностью за время $t < 0.04$ с. В верхней части пламени, в которую вода не попадала, происходило догорание паров ацетона.

В такой постановке был выполнен ряд экспериментов, и каждый раз горение практически мгновенно ($t < 0.04$ с) прекращалось. В ча-

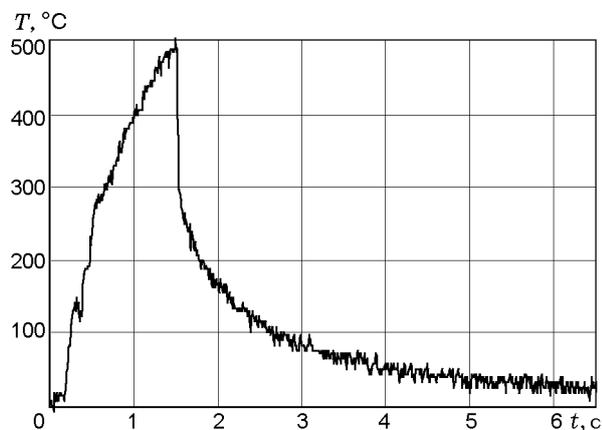


Рис. 5. Температура в зоне горения после попадания в нее диспергированной воды

сти подобных опытов измерялась температура в зоне горения с помощью хромель-копелевой термопары с регистрацией ее показаний на осциллографе TDS220 с частотой опроса 4 мс. На рис. 5 приведена осциллограмма одного из опытов; она иллюстрирует быстрое охлаждение зоны горения после попадания в нее диспергированной воды.

Очевидно, что эффективность гашения пламени в данном случае определяется тем, что диспергированная вода попадает в область, где происходит испарение ацетона и начинается его горение. Быстрое охлаждение продуктов горения в этой области резко замедляет скорость реакции (скорость испарения ацетона), и одновременно за счет испарения капель воды создается барьер между источником паров ацетона и догорающими и всплывающими вверх остатками пламени. При этом реализуются следующие механизмы прекращения огня:

- охлаждение горящего вещества за счет теплообмена с каплями воды и возможного их испарения;
- разбавление реагирующих веществ парами воды;
- изоляция реагирующих веществ от пламени.

В одной серии опытов варьировалось расстояние от ампулы до пламени в пределах $R = 20 \div 30$ см. При этом, за редким исключением, происходит полное гашение пламени. Один из таких единичных случаев приведен на рис. 6. Кадры видеоролика показывают, что горение полоски бумаги, смоченной ацетоном, прекра-

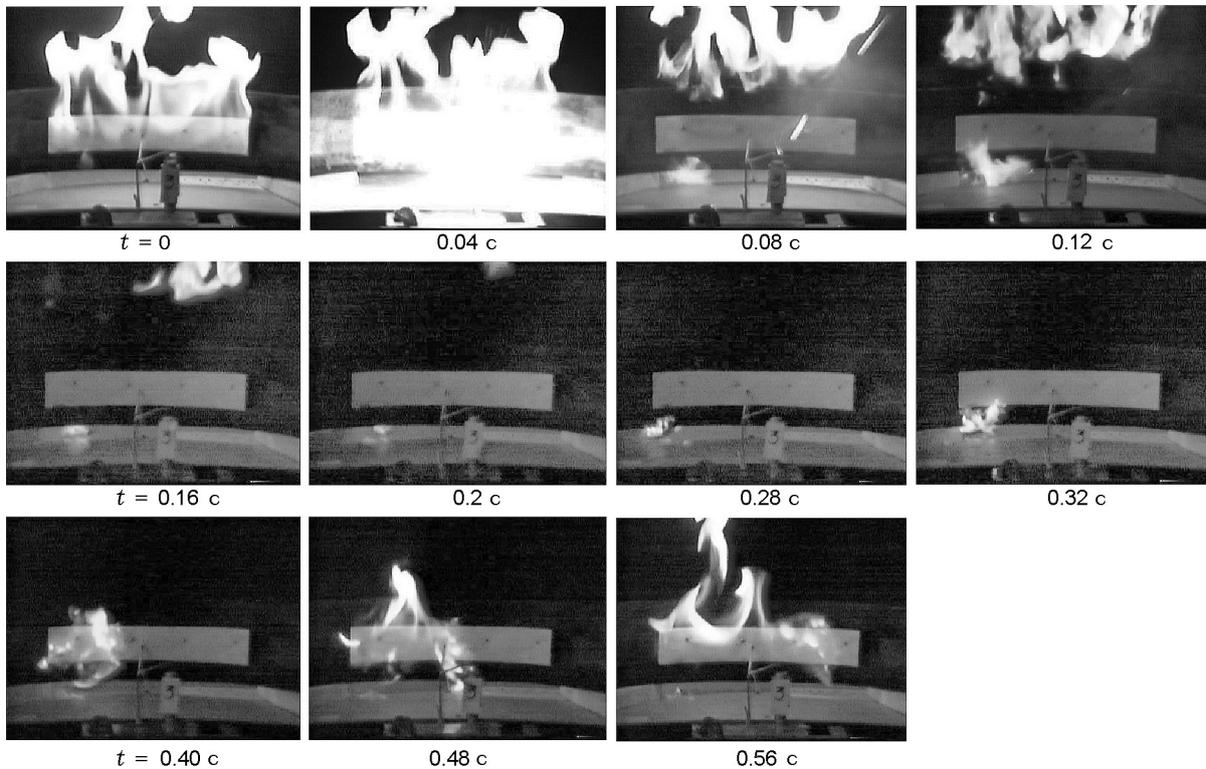
тилось, но затем очень быстро ($t < 1$ с) возобновилось от пламени капля ацетона на плоскости стола, находившихся ниже экрана с бумагой и не попавших в зону действия диспергированной воды.

Таким образом, после гашения диспергированной водой пламени в зоне испарения ацетона отсеченная верхняя догорающая часть пламени довольно быстро всплывает вверх, удаляясь от потушенной, но достаточно нагретой зоны около полоски бумаги, и не успевает вторично поджечь пары ацетона в этой зоне. Однако если в нижней части, под зоной воздействия диспергированной воды, имеются источники пламени, то они вызывают быстрое повторное возгорание.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДЫ С ПЛАМЕНЕМ

Для анализа результатов экспериментов выполнено численное моделирование разлета капель воды и их взаимодействия с областью горячих продуктов горения. Для этого использовался одномерный аналог газодинамической методики [11]. Методика основана на применении подхода [12], в котором диспергированная вода описывается как двухскоростная двухфазная среда, что позволяет учесть скоростную неравновесность фаз — капель воды и газовой фазы. Учитываются процессы обмена массой (испарение капель), импульсом (трение) и энергией (межфазный теплообмен) между каплями и газовой фазой. В газовой фазе учитывались три компонента: воздух, водяной пар и продукты горения пламени. Для интенсивности межфазного массообмена при испарении использовалось выражение из [12] для газозвеси. Дифференциальные уравнения сохранения решались численно конечно-разностным методом [13].

Задача рассматривалась в одномерной цилиндрической геометрии. В расчете вода с самого начала считалась дисперсной средой с заданным начальным диаметром капель d_0 (взрыв проволоочки и разрушение воды на капли не моделировались). Начальная объемная доля капель задавалась равной 0.9 (это значение следует рассматривать как эффективное). Продукты взрыва проволоочки считались сжатым нагретым идеальным газом, начальные параметры которого подбирались по наилучшему описанию экспериментальной R - t -ди-

Рис. 6. Взаимодействие диспергированной воды с пламенем ($R = 25$ см)

аграммы разлета облака капель. Пламя ацетона рассматривалось как неподвижный нагретый газ с начальной температурой 1500 К, заполняющий область $R = 20 \div 21$ см. Ее внешняя граница считалась неподвижной непроницаемой стенкой (моделировала экран, на котором укреплена полоска горячей бумаги). Пространство между водой и пламенем, а также в промежутках между каплями воды изначально считалось заполненным воздухом.

Результаты расчетов с начальным диаметром капель $d_0 = 100$ мкм представлены на рис. 7–9. На рис. 7 показаны профили скоростей фаз v_1 , v_2 и объемной доли капель α_2 в ходе начальной стадии. Здесь и далее параметры газовой фазы обозначены индексом 1, капель — индексом 2.

Вначале газ заметно опережает капли. За счет межфазного трения он увлекает за собой капли, в результате чего передний фронт облака капель размывается. После отражения волны сжатия, идущей по газу, скорость газа становится меньше скорости капель и газ затормаживает движение капель из-за межфазного трения. На рис. 8 приведены профили объем-

ной доли капель и температуры газа при полете облака капель к горячей зоне.

Подлетающие капли быстро охлаждают горячий газ. Температура газа падает от 1500 до 400 К примерно за 2.5 мс. Объемная доля капель сначала уменьшается из-за разлета, затем немного увеличивается за счет их остановки у стенки, характерное значение максимума α_2 в ходе тушения составляет ≈ 0.005 . Это значение хорошо согласуется с величиной α_2 , определенной из эксперимента по кадрам кинограмм разлета воды с учетом того, что объем воды в ходе разлета сохраняется, а ширина облака капель линейно растет со временем.

Из рис. 9 следует, что подобранные параметры продуктов взрыва проволоочки позволяют достаточно точно описать экспериментальную $R-t$ -диаграмму. Более сильное торможение капель в расчете, по-видимому, связано с одномерным характером моделирования. Начиная с момента времени $t \approx 5$ мс $R-t$ -диаграмма выходит на горизонтальную прямую, что соответствует остановке капель у стенки.

Для анализа динамики и механизма тушения пламени в экспериментах были выполнены

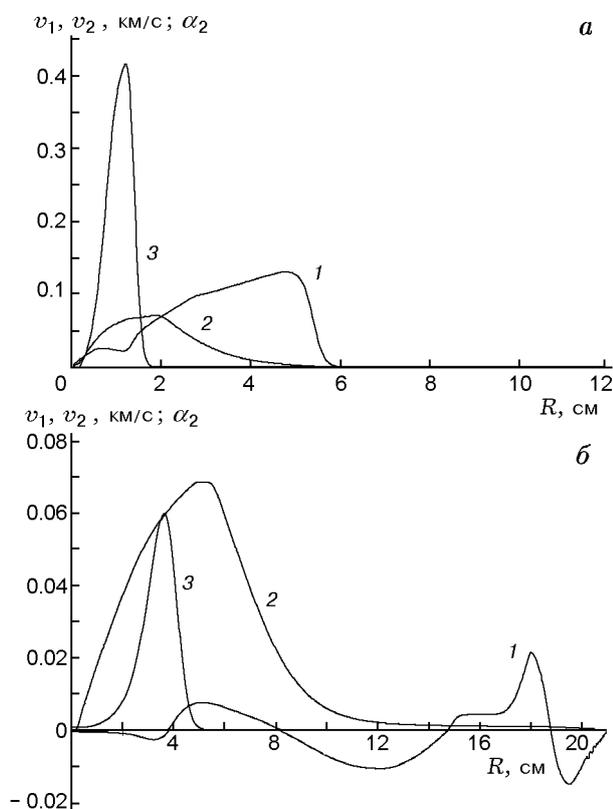


Рис. 7. Расчетные профили скоростей газовой (1) и конденсированной (2) фаз и объемной доли капель (3) на начальной стадии в моменты времени 0.1 (а) и 0.5 мс (б)

расчеты в упрощенной постановке — без учета движения вещества. В расчетной области, заполненной смесью газа и капель и ограниченной неподвижными стенками, задавались однородные начальные условия: температура газа и капель $T_{10} = 1500$ К, $T_{20} = 300$ К; начальное давление газа $p_0 = 1$ атм. В расчете с $d_0 = 100$ мкм и $\alpha_{20} = 0.005$ уменьшение температуры газа до 400 К происходило примерно за 2.5 мс, что согласуется с результатами расчета, учитывающего движение. Максимальный нагрев капель не превышал 10 К, что указывает на отсутствие их испарения. В то же время моделируемая ситуация не вполне соответствует экспериментальной, поскольку в расчетах рассматривается неподвижный нагретый газ без притока массы и энергии. Поэтому все предыдущие расчеты дают оценку снизу для времени охлаждения и оценку сверху для времени испарения капель. Для того чтобы снизу

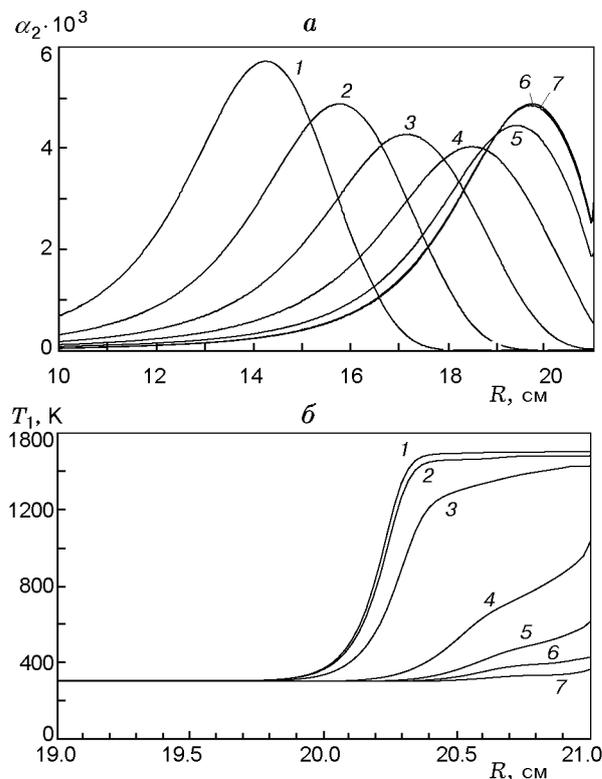


Рис. 8. Расчетные профили объемной доли капель (а) и температуры газа (б) при подлете облака капель к горячей зоне на моменты времени:

t , мс: 3 (1); 3.5 (2); 4 (3); 4.5 (4); 5 (5); 6 (6); 10 (7)

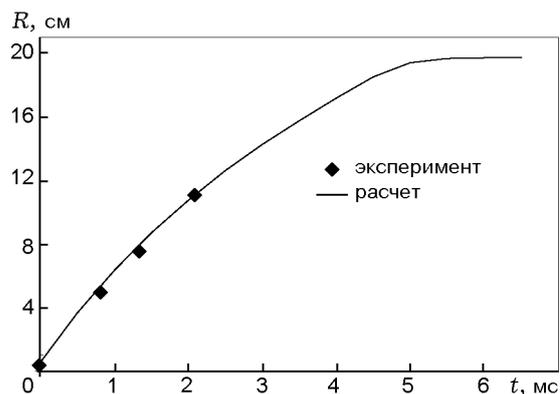


Рис. 9. R - t -диаграмма полета облака капель

оценить время испарения капель, были выполнены расчеты без учета движения, в которых температура газа поддерживалась постоянной $T_1 = T_{10} = 1500$ К. Результаты такого расчета с $d_0 = 100$ мкм и $\alpha_{20} = 0.005$ показали, что испарение капель заканчивается к моменту времени $t \approx 60$ мс. Тушение горения в эксперименте происходит за время $t < 40$ мс. Поэтому

экспериментальная ситуация является промежуточной между двумя предельными, рассмотренными в расчетах: температура газа падает, но более медленно из-за притока новых порций горячего газа. Таким образом, в течение тушения горения в эксперименте возможно только частичное испарение капель.

Оценим время заполнения зоны тушения новой порцией продуктов горения и сопоставим его с характерным временем тушения (спада температуры газа). В экспериментах струя диспергированной воды подается в нижнюю часть пламени, которая, согласно разбиению пламени пожара на зоны [14], соответствует области устойчивого пламени. Эмпирическая зависимость скорости газа на оси пламени в этой области (v_0) от высоты над поверхностью горения (z , м) для небольшого пожара (с поперечным размером ≈ 0.3 м) имеет вид [14]

$$v_0 \approx kz^{1/2}, \quad (1)$$

где $k = 6.8 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$. Применительно к условиям выполненных экспериментов ($z = 1 \div 5 \text{ см}$) получаем $v_0 \approx 0.7 \div 1.5 \text{ м/с}$. Отметим, что зависимость (1) получена для очага горючего, уже находящегося в газообразном состоянии. При горении жидкости (ацетона) скорость подачи горючих газов будет меньше, так как она ограничена процессом испарения. Поэтому в условиях наших экспериментов будет $v < v_0$. Примем размер зоны гашения Δz равным по порядку высоте ампулы с водой: $\Delta z \approx 1 \text{ см}$. Время заполнения зоны гашения новой порцией горячего газа t_{in} определяется по формуле

$$t_{in} \approx \Delta z/v > \Delta z/v_0 \approx 10 \text{ мс}.$$

Если время значительного снижения температуры газа в зоне гашения (t_q) меньше времени заполнения (t_{in}), то пламя гаснет, в противном случае гашение не происходит. По результатам расчетов условие $t_q < t_{in}$ выполняется, поскольку в расчете $t_q \approx 3 \text{ мс}$. В эксперименте с помощью обычной киносъемки получена только верхняя оценка для времени тушения $t_q < 40 \text{ мс}$ (интервал между кадрами). В дальнейшем предполагается провести аналогичные эксперименты с использованием скоростной киносъемки, что позволит значительно уточнить величину t_q .

Время заполнения t_{in} является характеристикой сгорающего топлива. При тушении, как правило, реально можно управлять только величиной t_q . Из результатов расчетов следует,

что наиболее сильно можно уменьшить t_q , снижая размер капель ($t_q \sim d_0^2$), и менее эффективно, увеличивая их концентрацию ($t_q \sim 1/\alpha_{20}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен лабораторный метод экспериментального исследования гашения пламени импульсным воздействием диспергированной воды. Результаты экспериментов показали, что в рассматриваемых условиях гашение пламени происходит за время $t_q < 40 \text{ мс}$. Согласно результатам численного моделирования это время составляет 3 мс. Таким образом, импульсное воздействие диспергированной воды приводит к быстрому гашению пламени.

Недостатки традиционных методов тушения (компактной или слаборасширенной струей) особенно проявляются при тушении крупномасштабных и, в частности, лесных пожаров. Масштаб таких пожаров требует применения более мощных и высокопроизводительных методов тушения. В последние годы появился ряд предложений по тушению подобных пожаров диспергированной водой (или, более широко, диспергированными средами) при помощи летательных аппаратов [5–7]. Во всех этих предложениях диспергирование тушащей среды осуществляется импульсными методами с применением зарядов ВВ, порохов и пр. При этом облако диспергированной среды создается над зоной пожара и вбрасывается в эту зону.

Опираясь на результаты описанных выше опытов, можно предположить, что известные методы не являются оптимальными по следующим причинам. Над зоной пожара существует мощное восходящее конвективное течение продуктов горения и пламени, которое препятствует проникновению капель воды или тушащей диспергированной среды в зону горения. Кроме того, гашение пламени в первую очередь происходит в его верхней части, что неэффективно, поскольку, как показывает опыт, диспергированная тушащая среда должна направляться главным образом в зону начала горения газообразных продуктов пиролиза и останавливаться должна в этой же зоне.

Учитывая результаты описанных выше экспериментов, следует создавать облака диспергированной среды непосредственно в зоне пожара, в той области, где начинается горение газообразных продуктов пиролиза; в частности, в случае верховых лесных пожаров это

зона кроны деревьев. Облака диспергированной среды необходимо создавать синхронно в разнесенных относительно друг друга точках и таким образом, чтобы облака смыкались после взрыва. С этой точки зрения из известных решений предпочтительным является метод тушения лесных пожаров, предлагаемый в [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Повзик Я. С.** Пожарная тактика. М.: ЗАО «Спецтехника», 1999. С. 39.
2. **Корольченко А. Я.** Технология импульсного водяного пожаротушения IFEX 3000 // Пожаровзрывобезопасность. 2001. №2. С. 3–5
3. **Способ** создания газокапельной струи, установка для его осуществления и сопло для создания газокапельной струи: Пат. РФ 2107554 / Зуев Ю. В., Карпышев А. В., Лепешинский И. А. Оpubл. 27.03.98. Бюл. № 9.
4. **Захматов В. Д., Кожемякин А. С.** Перспективные импульсные устройства и автоматические системы пожаровзрывозащиты радиационно зараженных объектов // Пожаровзрывобезопасность. 1999. № 5. С. 69–72.
5. **Захматов В. Д., Пятова А. В., Быков С. А., Щербак Н. В.** Импульсная техника многоплановой защиты // Пожаровзрывобезопасность. 2000. № 3. С. 46–49.
6. **Способ** тушения лесных, степных и других пожаров и устройство для его осуществления: Пат. РФ 2 146 545, 20.03. 2000 / Субратов А. А., Захматов В. Д., Субратов И. А., Пивоварова М. А.
7. **Process and device for fighting fires from the air:** Pat. WO9706858, 27.02.97 / Rosenstock W.
8. **Способ** локализации и/или тушения пожаров и устройство для его реализации: Пат. РФ 2111032, 20.05.98 / Гуров А. И., Захаров В. И., Либерзон М. Р., Митин Б. С., Одновол Л. А., Сысцов А. С., Сытников А. Н.
9. **Алеханов Ю. В., Близнецов М. В., Власов Ю. А. и др.** Взаимодействие диспергированной воды с пламенем // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, № 6. С. 1–6.
10. **Близнецов М. В., Жидов И. Г., Мешков Е. Е. и др.** Развитие неустойчивости Рэлея — Тейлора на границе слоя сыпучей среды, ускоряемого сжатым газом // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, вып. 2. С. 90–94.
11. **Дибиров О. А., Цыкин С. В., Янилкин Ю. В.** Двумерное численное моделирование перехода горения пористого взрывчатого вещества во взрыв на основе модели многоскоростной гетерогенной среды // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 97–106.
12. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1.
13. **Fletcher D. F., Thyagaraja A.** Some calculations of shock and detonations for gas mixtures // Computers and Fluids. 1989. V. 17, N 2. P. 333–350.
14. **Драйздейл Д.** Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990.

*Поступила в редакцию 5/II 2004 г.,
в окончательном варианте — 20/XII 2004 г.*