

ПАРОВОЙ ВЗРЫВ ТОНКОСТЕННОЙ СТЕКЛЯННОЙ КАПСУЛЫ С ВОДОЙ

Ю.Б. Базаров¹, Ю.К. Барсуков², Г.Б. Красовский²,
А.И. Логвинов^{1,2}, Е.Е. Мешков^{1,2}, И.Н. Никитин¹,
В.А. Стародубцев¹, С.В. Цыкин¹, О.А. Шилов¹.

¹ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

²СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия во всем мире развиваются технологии тушения пожаров диспергированной (распылённой) водой (ДВ) с размерами капель менее ~100 мкм [1,2], в том числе в гидродинамической лаборатории СарФТИ [3÷5]. Высокая эффективность использования ДВ при тушении пожаров обусловлена ее огромной удельной поверхностью, что позволяет обеспечить быстрое охлаждение горячей зоны пожара за счет быстрого отбора тепла при испарении капель. Вместе с тем имеются принципиальные ограничения в реализации этих методов на практике при тушении реальных, особенно крупномасштабных пожаров, так как мелкие капли (с размером менее ~100 мкм) быстро теряют скорость в газовой среде и не могут проникнуть в ядро большого пожара.

Способ тушения пожаров при помощи тонкостенных герметичных капсул с водой диаметром ~5÷7 мм [6] направлен на решение этой проблемы. Капсулы такого размера могут проникать вглубь большого пожара. В то же время такие капсулы должны по оценкам взрываться в течение нескольких секунд после попадания в пламя с образованием облака смеси пара и ДВ. Это подтверждается экспериментами [7].

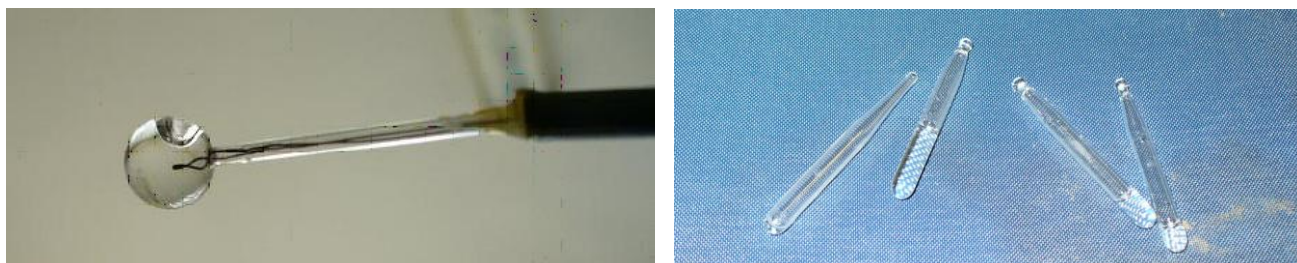
В данной работе представлены результаты экспериментального исследования динамики парового взрыва капсулы с водой, нагреваемой пламенем, с целью определения некоторых характеристик этого взрыва, включая время задержки парового взрыва от начала нагрева, размеры и скорость образующихся капелек ДВ, предельные размеры облака ДВ. Также приводятся результаты экспериментов по гашению пламени облаком ДВ, образующемся при паровом взрыве капсулы.

1. Техника эксперимента

В результате поиска было найдено, что наиболее подходящим материалом для изготовления капсул является стекло [8]. Была отработана стеклодувная технология изготовления капсул с водой различной геометрии (сферических и цилиндрических [9,10]). В качестве заготовки для изготовления капсул служили трубки из стекла марки С52 – 1 и С37 – 2. Типичные размеры сферических капсул (рис.1а), использовавшихся в экспериментах: диаметр капсулы $d=7$ мм, толщина стенки сферической части капсулы $\Delta_{cp}=0.23\div 0.25$ мм, объем воды в капсуле 0.14мл. Типичные размеры цилиндрических капсул (рис.1б), использовавшихся в экспериментах: диаметр капсулы $d=5$ мм, толщина стенки цилиндрической части капсулы $\Delta_{cp}=0.4\div 0.5$ мм, длина 45мм, объем воды в капсуле 0.3мл.

Температура воды в капсуле в процессе нагрева в некоторых экспериментах измерялась термопарой типа хромель/алюмель с диаметром проволоки 0.2мм (рис.1а).

Капсулы нагревались пламенем различного типа: газовой горелки, спиртовки и фитилем, смоченным в керосине и помещенным в металлическую кювету. Для нагрева капсул применялись горелки разного типа как стандартные, так и самодельные. Нестандартные газовые горелки изготавливались из алюминиевых трубок с внутренним диаметром $d=8\text{мм}$. Такие горелки имели прямолинейную или спиральную форму.



а)
б)
Рис. 1. Фотографии: а) – сферическая капсула с термопарой,
б) – цилиндрические капсулы

Для регистрации картины течения, возникающего при взрыве капсулы, использовалась скоростная видеокамера GmbH-MotionBLITZ со скоростью съемки до 1000 кадров в секунду и более.

Для изучения механизма взаимодействия облака ДВ с пламенем и более точной визуализации границы разлетающегося облака ДВ использовалась модификация широко известного метода лазерного ножа - метод «лазерной иглы». В этом методе был использован луч многоволнового аргонового лазера ЛГ106MS с постоянным излучением мощностью 1W с длиной волны излучения $\lambda=0.5145\text{мкм}$. Диаметр луча порядка $\sim 1\text{мм}$.

Размеры капель в разлетающемся облаке ДВ измерялись методом рассеяния лазерного излучения. Его сущность состоит в измерении углового распределения (индикатрисы) рассеянного света с последующим определением размера частиц ДВ по табличным значениям [11]. В качестве источника света использовался указанный выше лазер. Регистрация угловой зависимости интенсивности рассеянного излучения осуществлялась при помощи фотоумножителей.

2. Параметры парового взрыва капсулы

На рисунке 2 приведена типичная картина разлета облака ДВ при паровом взрыве сферической (рис.2а) и цилиндрической капсул (рис.2б). В случае сферической капсулы облако ДВ, образующееся при паровом взрыве капсулы, имеет характерный диаметр $\sim 10\div 12\text{ см}$, при этом край облака сильно возмущен и возмущения носят нерегулярный и невоспроизводимый характер. При взрыве цилиндрической капсулы образуется облако ДВ диаметром $\sim 30\text{ см}$ и высотой (вдоль оси капсулы) $\sim 10\text{ см}$, и имеет сравнительно регулярный и воспроизводимый характер.

В начальной стадии исследований эксперименты проводились с капсулами сферической формы. Но в дальнейшем использовались только цилиндрические капсулы.

Рисунки 3÷5 иллюстрируют особенности взрыва типичной цилиндрической капсулы. На рисунке 3 приведена зависимость температуры воды в капсуле от времени, измеренной при помощи термопары. Типичная температура взрыва цилиндрических капсул изменялась от 250 до 320°C .

Время нарастания интенсивности рассеянного лазерного света (по уровню $0.1\div 0.9$) на фронте облака ДВ составляло $5\pm 1\text{ мкс}$. Средний размер капель воды, определенный по этим измерениям на фронте облака, лежит в пределах $0.3\div 0.4\text{ мкм}$.

На рисунке 4 приведены кадры видеогаммы опыта, в котором регистрация течения велась вдоль оси капсулы. Из этих кадров видно, что облако приобретает форму тора. При этом визуализируется не только свет, рассеянный «лазерной иглой», но и вторичное рассеяние света в облаке ДВ, качественно характеризующее распределение ДВ в облаке.

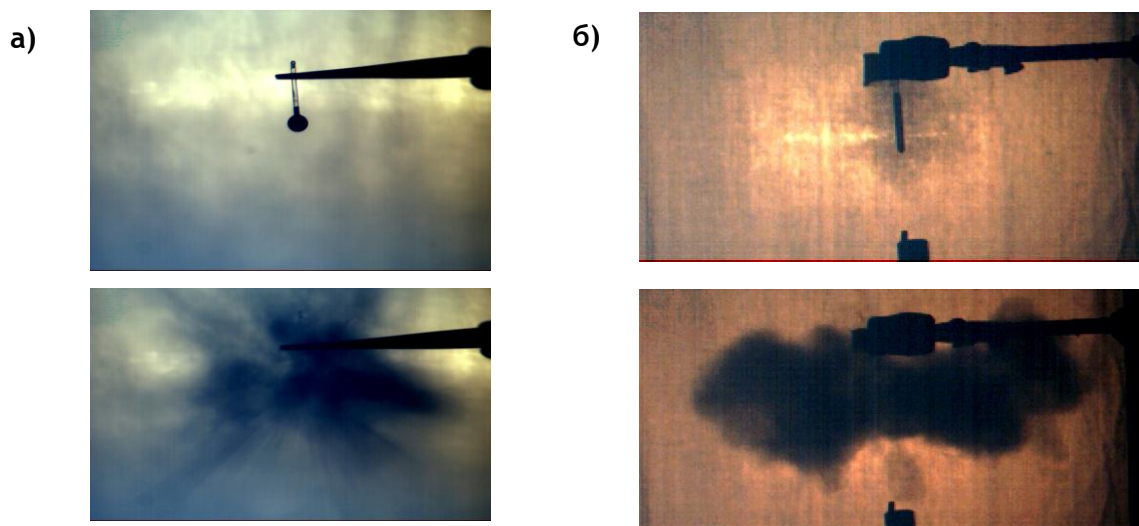


Рис. 2. Кадры видеогаммы разлёта облака диспергированной воды
а) - сферическая капсула и б) – цилиндрическая капсула.

На рисунке 5 приведена типичная зависимость размеров облака ДВ: диаметра (d) и высоты (h) от времени. На начальной стадии разлета скорость разлета границы облака ~ 100 м/с, а в конечной стадии ~ 10 м/с. Следует отметить, что отношение d/h на поздних стадиях разлета облака может варьироваться в пределах $1.5 \div 3$.

Как видно из приведенных кадров видеогамм, облако ДВ, образующееся при взрыве цилиндрической капсулы, имеет более регулярную воспроизводимую форму по сравнению с облаком, образовавшимся при взрыве сферической капсулы. Имеется и другое преимущество цилиндрической капсулы. Пламя пожара должно разогревать капсулу до ее взрыва за несколько секунд. Это условие накладывает ограничение на характерный размер капсулы. В случае сферической капсулы это соответствует диаметру $3 \div 5$ мм [6]. В случае цилиндрической капсулы для выполнения указанного условия ограничение накладывается только на диаметр капсулы, но не на длину, которая выбирается из практических соображений. Соответственно, объем воды в такой капсуле может на порядок и более превышать объем воды в сферической капсуле. И, следовательно, во столько же раз потребуется меньшее количество капсул для тушения одинакового объема пламени.

На рисунке 6 приведена известная зависимость давления насыщенных паров воды в зависимости от температуры [12]. Эта зависимость, в сочетании с результатами измерений температуры воды, при которой происходит взрыв капсулы, дает информацию о масштабах давления, достигаемых в капсуле. Измерение температуры воды, полученное в ряде опытов с цилиндрическими капсулами, указывает, что температура варьируется в интервале $250 \div 320$ °С. Соответственно, давление пара в цилиндрических капсулах изменяется в интервале $5 \div 10$ МПа.

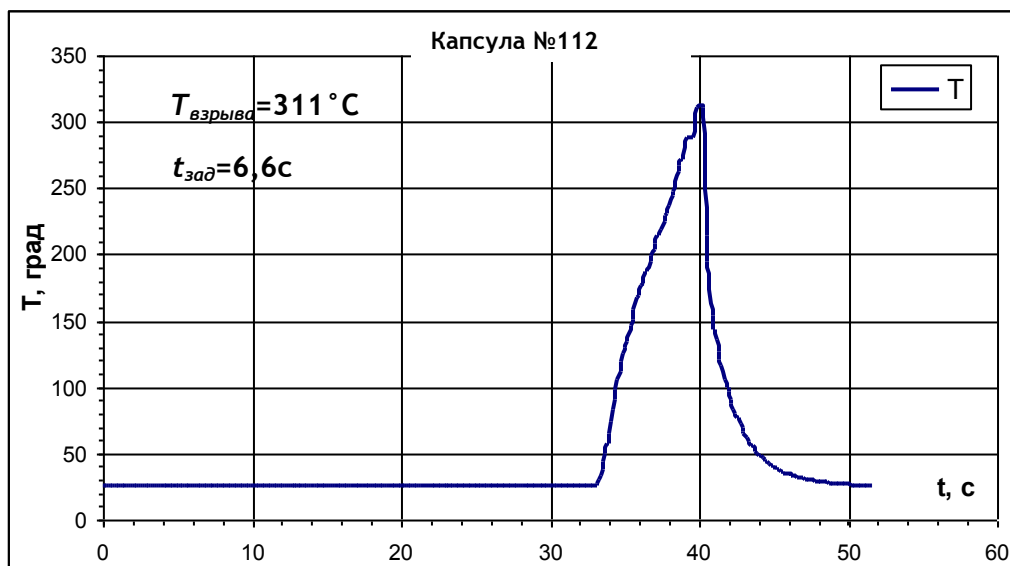


Рис. 3. Зависимость от времени температуры воды в цилиндрической капсуле (№112) в процессе нагрева. Параметры капсулы: марка стекла С37 – 2, диаметр $d = 4\text{мм}$, толщина стенки $0,2\text{ мм}$, длина 45мм , объем воды $0,25\text{ мл}$ (момент начала нагрева соответствует началу роста температуры).

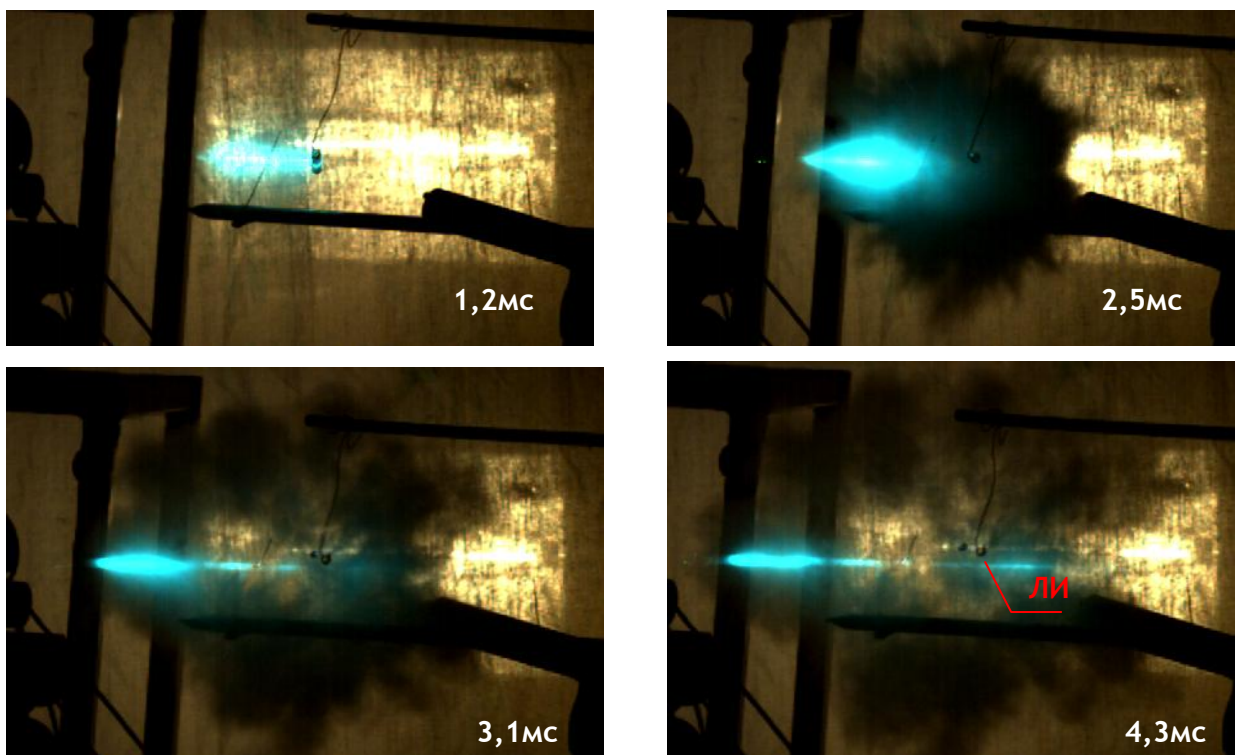


Рис. 4. Съёмка разлёта облака ДВ, образовавшегося при паровом взрыве цилиндрической капсулы с водой, с применением лазерной иглы. Съёмка велась в направлении оси капсулы. Параметры капсулы: марка стекла С37 – 2, диаметр $d = 5\text{мм}$, толщина стенки $0,5\text{ мм}$, длина 45мм , объем воды $0,3\text{ мл}$.

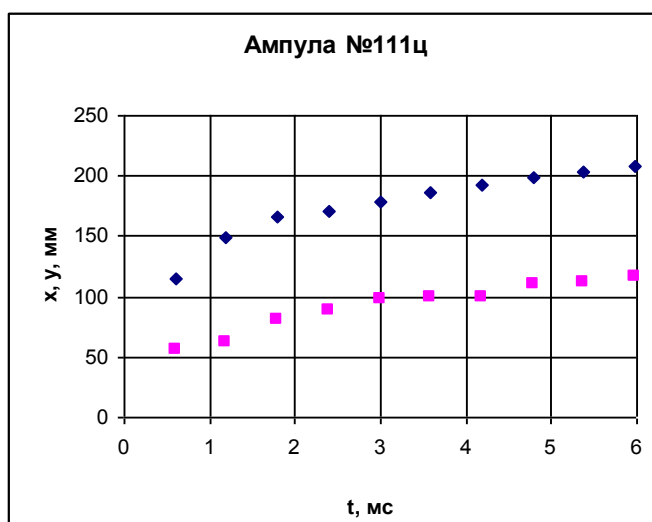


Рис. 5. Кинематика разлета облака ДВ, образовавшегося при паровом взрыве цилиндрической капсулы №111. \blacklozenge - диаметр, \blacksquare - высота.

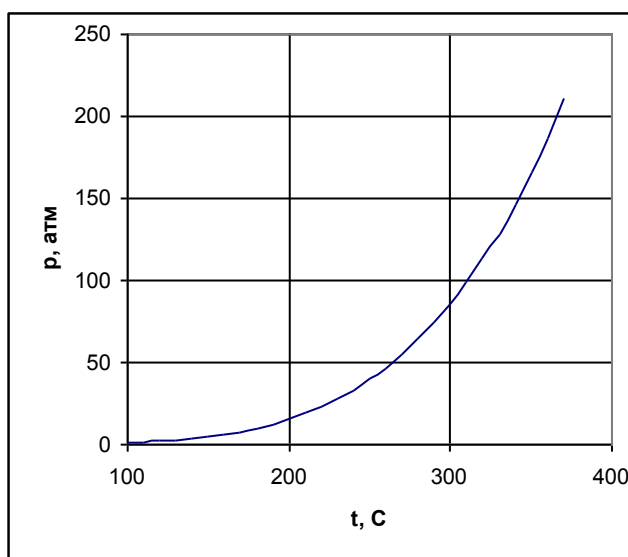


Рис.6. Зависимость давления насыщенных паров воды в зависимости от температуры [12].

Паровой взрыв стеклянной капсулы сопровождается разлетом осколков. Из наших экспериментов следует, что при взрыве цилиндрической капсулы вместе с облаком ДВ образуется облако разлетающихся стеклянных осколков с характерным размером $\sim 1\div 2$ мм и характерной массой $\sim 20\div 30$ мг. Осколки разлетаются в виде кольца, ось которого совпадает с осью капсулы, и имеют начальную скорость $\sim 80\div 90$ м/с.

Наряду с изготовлением тонкостенных капсул с водой из стекла, были сделаны попытки изготовления капсул из полимерных материалов. Однако эти попытки оказались безуспешными. Исследования показали, что полимерные пленки прогорают при температуре воды внутри капсулы, близкой к температуре кипения. Возможно, это связано с низкой теплопроводностью пленки. В процессе нагрева воды на поверхности пленки формируется газовый пузырек, при этом условия теплоотвода от пленки к воде резко ухудшаются. Боковой теплоотвод также затруднен. Поэтому происходит локальное прогорание пленки.

Использование пленок с тонким алюминиевым покрытием существенно не изменило результат. Таким образом, экспериментально было показано, что полимерные материалы, применяемые в качестве материала для изготовления капсул с водой, не обеспечивают возможности эффективного парового взрыва.

Испытания образцов из алюминиевой фольги показали возможность получения перегретой жидкости и парового взрыва с разрушением фольги. Однако характер разрушения фольги существенным образом отличается от характера разрушения стекла в стеклянных капсулах. Фольга рвется на отдельные крупномасштабные фрагменты. Аналогичный результат был получен при испытании цилиндрических капсул, изготовленных из алюминия. Такие капсулы не разрушаются на мелкие осколки; просто в цилиндрическом корпусе капсулы формируется трещина вдоль образующей цилиндрическую поверхность капсулы. В этом случае невозможно образование регулярного воспроизводимого облака ДВ при взрыве капсулы. Таким образом, только уникальное сочетание свойств стекла позволило создавать из него тонкостенные герметичные капсулы с водой для тушения пламени. С одной стороны, это достаточно высокая теплопроводность, которая препятствует локальному прогоранию стенки капсулы под действием пламени. А с другой стороны, высокая хрупкость стекла обеспечивает возможность разрушения капсулы на мелкие осколки, тем самым, обеспечивая возможность образования облака ДВ приемлемо регулярной и воспроизводимой формы.

Вместе с тем существует возможность выполнения капсулы составной, причем составные части капсулы должны быть соединены веществом, теряющим прочность при заданной температуре парового взрыва [13]. Такая капсула может быть выполнена из металла, а в качестве соединяющего вещества использован припой. Можно представить себе капсулу из металла, собранную из двух половин и спаянную припоем с температурой плавления около 200°C. При достижении температуры плавления припоя корпус капсулы будет распадаться симметричным образом на две половины, и, тем самым, будет обеспечено образование симметричного регулярного и воспроизводимого облака ДВ.

В случае составных капсул из металла их разрушение будет определяться одним параметром - температурой плавления припоя, которым они соединены. Эта величина постоянная, и это, в принципе, обеспечивает возможность высокой степени синхронизации взрыва ансамбля капсул.

Паровой взрыв капсулы сопровождается достаточно мощным звуковым импульсом по амплитуде, соответствующим звуку пистолетного выстрела. Это обстоятельство дает возможность разработать простой и весьма экономичный способ оповещения о начавшемся пожаре [14]. Простые устройства, подобные описанным выше капсулам, могут размещаться в потенциально пожароопасных местах. При появлении в этих местах открытого пламени такие устройства будут срабатывать в течение нескольких секунд после попадания в пламя, с достаточно громким звуком. В силу простоты эти устройства практически не теряют работоспособности с течением времени. Кроме этого подобные устройства в силу своей простоты, обладают высокой надежностью и практически неограниченным сроком службы.

3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОБЛАКА ДВ С ПЛАМЕНЕМ

При изучении взаимодействия облака ДВ с пламенем высказывались предположения, что одновременно с испарением существенную роль играет воздействие ударной волны, возникающей при паровом взрыве капсулы. Результаты экспериментов, проведенных с помощью «лазерной иглы», позволяют дать ответ на этот вопрос. Кадры видеogramмы взаимодействия облака ДВ с пламенем газовой горелки приведены на рисунке.7.

Горелка представляет собой алюминиевую трубку диаметром 9 мм с отверстиями диаметром 1 мм. После теплового взрыва капсулы образуется облако ДВ. Распространение этого облака хорошо визуализируется лазерной иглой.

На приведённых кадрах видно, что испарение ДВ происходит на движущемся фронте облака, а воздействия ударной волны не наблюдается.

На рис.8 приведены кадры видеограммы гашения столба пламени диаметром ~10 см спиральной газовой горелки цилиндрической капсулой длиной 45 мм. Капсула располагалась по оси столба пламени над горелкой. Из видеограммы видно, что после взрыва капсулы образующееся облако ДВ гасит пламя горелки. Эксперименты показывают, что гашение пламени происходит непосредственно при соприкосновении облака ДВ с пламенем; ДВ как бы слизывает пламя. При увеличении диаметра цилиндрической капсулы (по сравнению с использованными в наших экспериментах) должно также происходить увеличение размера облака ДВ. Соответственно, при помощи такого устройства большого размера можно тушить газовые фонтаны, как это было предложено в [15].

На рис.9 приведен пример взаимодействия цилиндрического облака ДВ с другим типом пламени – горящим фитилем, расположенным в металлической кювете с керосином. Как видно из этого рисунка, облако ДВ эффективно гасит и такой вид пламени.

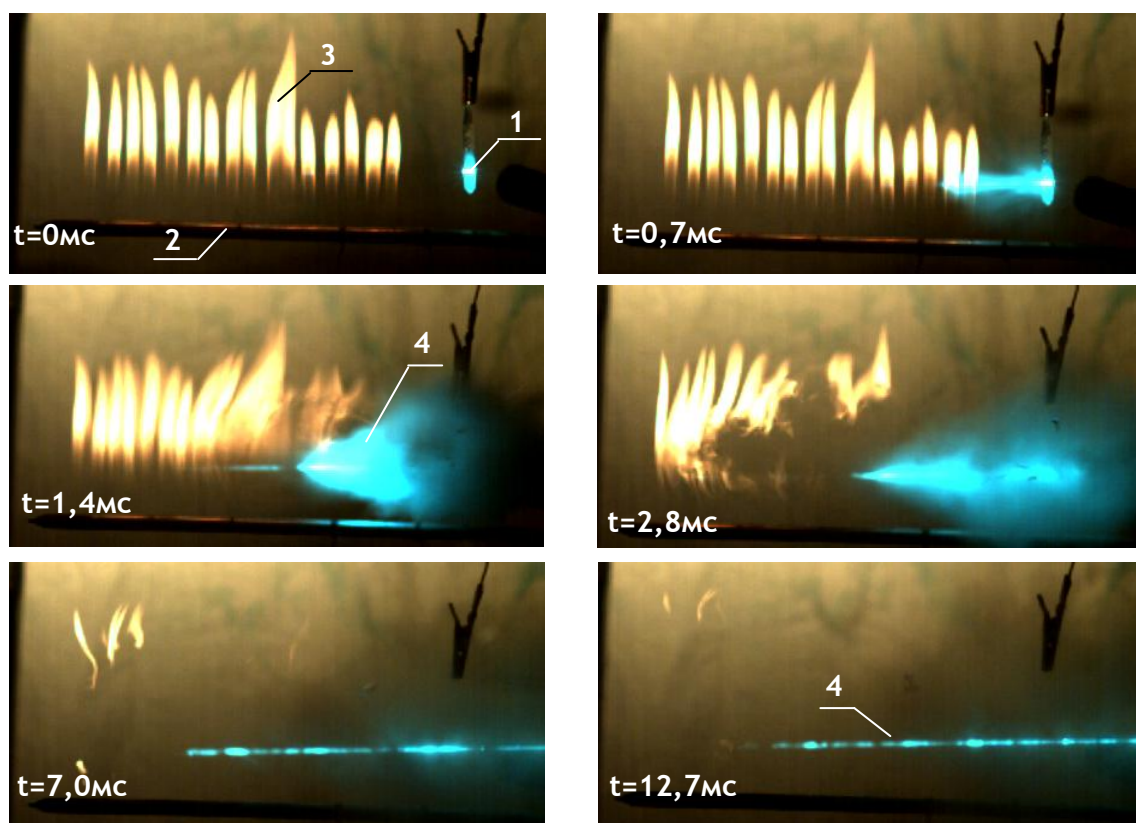


Рис. 7. Видеограмма тушения пламени горизонтально расположенной линейной газовой горелки облаком ДВ при паровом взрыве цилиндрической стеклянной капсулы № 94. Параметры капсулы: $L=45\text{мм}$, $d=5\text{мм}$, $\Delta=0.5\text{мм}$. Объем воды в капсуле $V_{\text{воды}}=0.25\text{мл}$.

Обозначения: 1 – капсула с водой (нагревается отдельной горелкой); 2 – линейная газовая горелка; 3 – пламя горелки; 4 – свет «лазерной иглы», рассеянный облаком ДВ.



Рис. 8. Кадры видеोगраммы опытов по тушению пламени спиральной газовой горелки (диаметром ~ 10 см) облаком ДВ при паровом взрыве цилиндрической стеклянной капсулы ($L=45$ мм, $d=5$ мм, $\Delta=0.5$ мм, $V_{\text{воды}}=0.25$ мл), помещенной в пламя горелки. 1 – спиральная горелка; 2- пламя горелки; 3 – облако ДВ, образовавшееся при взрыве капсулы.

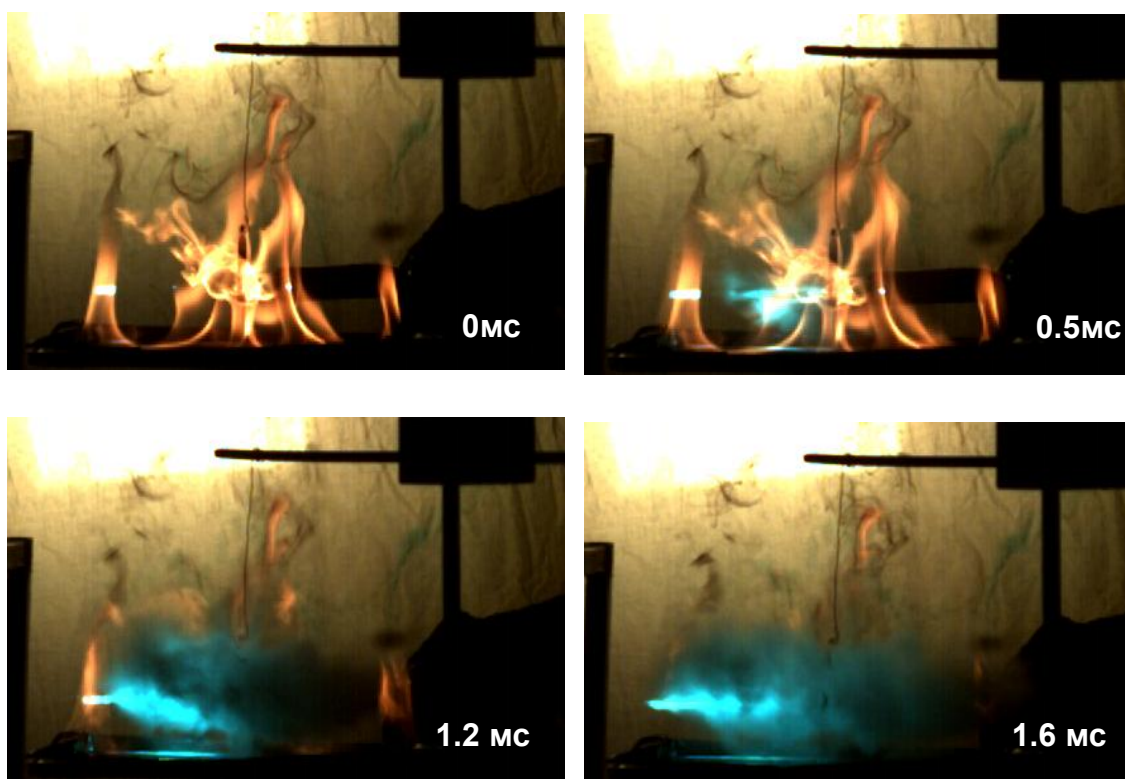


Рис. 9. Кадры видеोगраммы гашения пламени плоского фитиля, смоченного керосином, облаком ДВ, образующимся при паровом взрыве цилиндрической стеклянной капсулы длиной 45 мм, помещенной над пламенем.

Полученные экспериментальные результаты согласуются с результатами одномерных расчетов, которые выполнялись с помощью сформулированной ранее модели [4], основанной на теории многофазных гетерогенных сред, аналогично тому, как это делалось в [4]. Паровой взрыв капсулы с водой имитировался заданием разрыва в начальных условиях, разделяющего область сжатого пара и капель в области капсулы и окружающего воздуха. Капли ДВ в течение всего расчета считались монодисперсными. Область пламени имитировалась горячим газом (продуктами горения) с начальной температурой примерно равной максимальной температуре пламени.

Результаты выполненных расчетов показали, что для капель ДВ диаметром 1мкм (примерно соответствующим измеренному в экспериментах) тушение пламени

происходит в узкой зоне контакта облака капель с пламенем (пламя буквально слизывается расширяющимся облаком ДВ), что качественно соответствует результатам экспериментов. Тем самым подтвержден вывод о тепловом механизме тушения пламени от взрыва капсулы с водой, вытекающий из результатов экспериментов. Длительность тушения пламени радиусом 50мм по результатам расчетов не превышает 1мс, что примерно соответствует экспериментальным данным.

Отметим также, что обнаруженный режим поверхностного тушения характерен для взаимодействия с пламенем сравнительно мелких капель (размером ~1мкм). Для облака ДВ с более крупными каплями (~100мкм) согласно результатам расчетов [4] тушение имеет объемный характер.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ №3586.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.В.Алеханову, С.А.Ломтеву, О.В.Медведеву, Е.Н.Поздняковой, А.А.Половникову, Е.А.Половникову, А.С.Сафронову, А.Д.Сладкову, А.Ю.Сюндюкову и С.А.Янкову за техническую помощь при проведении экспериментов и помощь при оформлении материалов доклада.

Литература

1. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я. и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочное издание // М., Химия, 1987, 272с.
2. Повзик Я.С. Пожарная тактика. М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 1999, с.39.
3. Ю.В.Алеханов, М.В.Близнецов, Ю.А.Власов, В.И.Дудин, А.Е.Левушов, А.И.Логвинов, С.А.Ломтев, Е.Е.Мешков. Взаимодействие диспергированной воды с пламенем. Письма в ЖТФ. 2003. -Т.29, №6, С.1÷6.
4. Алеханов Ю.В., Близнецов М.В., Власов Ю.А., Герасимов С.И., Дудин В.И., Левушов А.Е., Логвинов А.И., Ломтев С.А., Мармышев В.В., Мешков Е.Е., Семенов Ю.К., Цыкин С.В. Метод исследования взаимодействия диспергированной воды с пламенем. // Физика горения и взрыва, 2006, т 42, №1, с. 57÷64.
5. Алеханов Ю.В., Левушов А.Е., Логвинов А.И., Ломтев С.А., Мешков Е.Е. О возможности получения смеси диспергированной жидкости с газом при помощи поршневой машины и его возможных применениях. // Письма в ЖТФ, 2004, т.30, вып. 18, с.50÷55.
6. Цыкин С.В. Способ тушения пожара. //Патент РФ № 2295370, 2005г
7. Базаров Ю.Б., Барсуков Ю.К., Красовский Г.Б., Мешков Е.Е., Потапов С.В., Цыкин С.В. Оптический метод исследования парового взрыва капсулы с водой при помощи цифровой видеокамеры// Оптические методы исследования потоков №9, 2007, с. 72-73
8. Барсуков Ю.К., Логвинов А.И., Мешков Е.Е., Цыкин С.В. Огнетушащий элемент // Заявка №2007147507 от 24.12.2007
9. Барсуков Ю.К., Мешков Е.Е., Цыкин С.В. Огнетушащий элемент // Патент РФ №2406552 от 20.12.2010.
10. Барсуков Ю.К., Мешков Е.Е., Цыкин С.В. Огнетушащий элемент и способ его получения// Патент РФ 2401674 от 20.10.10 Бюл. №29
11. Г. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. //М., ИЛ., 1961, 248.
12. Физические величины. Справочник под ред. И.С.Григорьева и Е.З.Мейлихова. //М. Энергоатомиздат. 1991.
13. Мешков Е.Е., Логвинов А.И. Огнетушащий элемент // Патент РФ на полезную модель №112832 от 27.01.12 Бюл.№3
14. Мешков Е.Е. Способ оповещения о пожаре и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2396602 от 10.08.2010

15. Павлов Е.С. Способ тушения пожаров. Авторское свидетельство СССР № 1695946А1, 1991г МК А62С 2/00.