

03

Особенности трансформации водяных снарядов при движении через высокотемпературные продукты сгорания

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
E-mail: pavelspa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 28 сентября 2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования процессов трансформации водяных снарядов („ядер“ сферической формы с начальным объемом 50–1000 ml) в процессе их свободного падения (с высоты 3 m) в высокотемпературной (около 1100 K) газовой среде (с применением модельного очага пожара). Исследования проведены для снарядов воды, ее растворов с NaCl и суспензий с частицами углерода. Определены условия и характеристики разрушения снарядов при их движении через высокотемпературные газы. Установлено замедление трансформации снаряда за счет его „сжатия“ в высокотемпературной зоне (по сравнению с умеренными температурами).

Исследования [1,2] показали нецелесообразность использования больших объемов воды, эмульсий и суспензий на ее основе при тушении крупных пожаров. При таком подходе более 90% объема задействованного тушащего состава расходуется нерационально [1,2]. Данные экспериментов [3,4] позволили заключить, что наиболее эффективным при ликвидации крупных пожаров может быть применение „безоболочечных“ [5] водяных „ядер“ (объем 100–1000 ml). В экспериментах [5–8] выделены закономерности разрушения таких „ядер“ при падении с высоты 1–3 m. Для разработки эффективных систем пожаротушения важно знать дистанции, которые могут пройти водяные „ядра“ до полного разрушения, а также конфигурации и размеры образующихся при этом фрагментов и капель жидкости.

В результате исследований [8] выделены четыре стадии разрушения водяного снаряда: „сплющивание“ и формирование „перешейков“; образование пузырей („парашютов“); разрушение пузырей и образование

водяных „цепочек“; формирование облака мелких капель. Определены [8] размеры образующихся капель и фрагментов жидкости после разрушения снаряда, вычислены числа Вебера, соответствующие каждой стадии разрушения. Для развития представлений [8] на реальные пожары целесообразно изучить особенности трансформации снарядов при их движении через высокотемпературные продукты сгорания. В лабораторных условиях проведение таких экспериментов затруднительно и ограничивается, прежде всего, необходимостью создания очага пожара. Представляет интерес определение условий и характеристик трансформации водяных „ядер“ (объем 50–100 ml) в пламенной зоне горения при проведении полевых испытаний с применением типичных модельных очагов пожара.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование особенностей трансформации водяных снарядов при движении через высокотемпературные продукты сгорания, соответствующие условиям типичных лесных пожаров.

Экспериментальный стенд (рис. 1) по основным элементам аналогичен [8]. В качестве видеорегирующей и измерительной аппаратуры использовались: высокоскоростная (частота кадров до $6 \cdot 10^5$ fps) камера CMOS 1 типа Phantom V411, рабочая станция 2, регистратор температуры 3 типа PMT-59M, термомпары марки ХА 10, весы РС-100W-10.

Для создания высокотемпературной газовой среды в экспериментах применялись модельные очаги пожара. Последние собирались в соответствии с ГОСТ Р 51057-2001 из брусков сосны сечением 50×50 mm и длиной 1 m. Высота модельных очагов составила 1 m. Для движения массива через высокотемпературные продукты сгорания в модельном очаге применялся сквозной вертикальный канал („туннель“) с поперечными размерами $0,5 \times 0,5$ m (выполнен вдоль оси симметрии очага 7). Таким образом, сброшенное в очаг „ядро“, двигаясь сверху вниз, беспрепятственно проходило сквозь высокотемпературные продукты сгорания и улавливалось выдвинутой тележкой 9. Перед началом эксперимента модельный очаг зажигался в соответствии с ГОСТ Р 51057–2001. По истечении 2–3 min после зажигания оболочка с жидкостью 4 закреплялась на предварительно отведенной в сторону поворотной раме 5 (высота от центра снаряда до основания уловителя 9 составляла около 3 m). Выполнялся ее поворот для размещения резиновой оболочки с „ядром“ над „туннелем“. При помощи держателя в направлении резиновой оболочки (аналогично экспериментам [8]) перемещалась

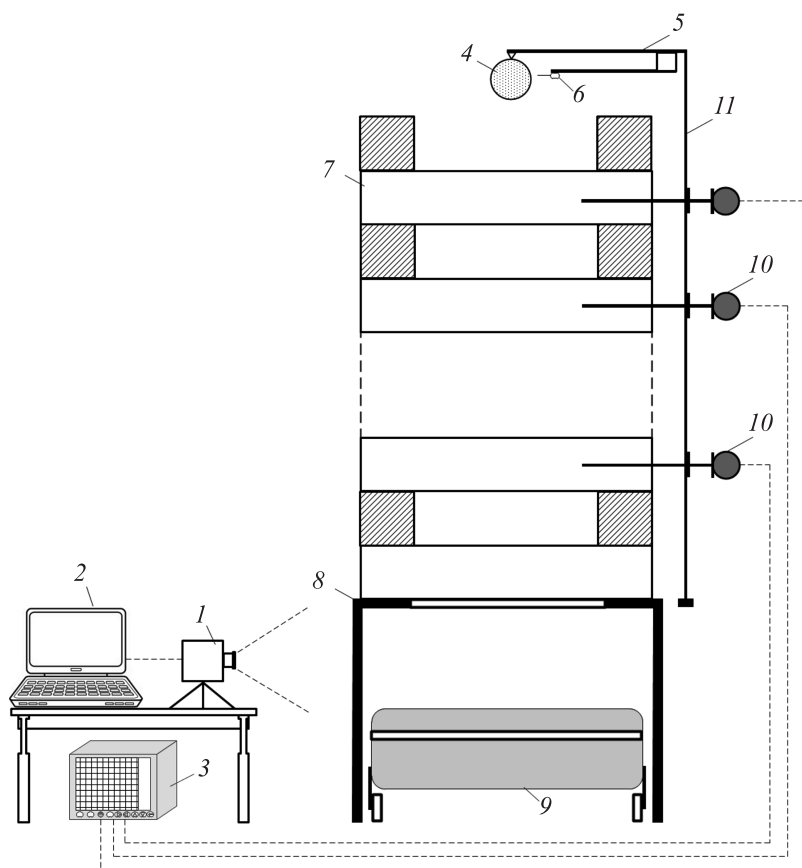


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — персональный компьютер; 3 — регистратор температуры; 4 — резиновая оболочка, заполненная жидкостью, раствором или суспензией; 5 — поворотная рама для закрепления резиновой оболочки; 6 — держатель с закрепленной иглой и возможностью горизонтального поступательного хода; 7 — „тело“ модельного очага пожара (на основе деревянных брусков); 8 — металлическая площадка (основание конструкции модельного очага со специализированным отверстием 500×500 mm в центре для прохождения „ядра“); 9 — выдвижная тележка с емкостью для улавливания фрагментов снаряда; 10 — термопары; 11 — защитная термозоляционная стена.

стальная игла 6. С применением последней инициировался разрыв оболочки „ядра“. Высвободившийся из оболочки жидкостный массив начал движение под действием гравитационных сил и проходил через „туннель“ (между горящими брусками). Процессы движения, деформации и разрушения массива регистрировались высокоскоростной видеокамерой 1 в нижней части стенда (на входе массива в уловитель 9). Видеофиксация движения массива в „туннеле“ не проводилась, так как была затруднена наличием открытого пламени и интенсивным образованием продуктов сгорания. Аналогично проводились опыты со сбросом снарядов в условиях умеренных (290–300 К) температур воздуха (также применялся „туннель“ модельного очага, но последний не зажигался).

Применялось программное обеспечение Tema Automotive [9], с помощью которого реализовывалось слежение за перемещающимся снарядом и отрывающимися от него фрагментами. Контролировались характерные (максимальные продольные и поперечные) размеры (l), скорость (u) и время (t) движения через „туннель“ водяного снаряда.

Температура продуктов сгорания T_f контролировалась инфракрасным пирометром Raytek (диапазон измеряемых температур 243–1173 К, максимальная погрешность $\pm 0.75\%$), а также хромель-алюмелевыми (диапазон измеряемых температур 233–1523 К, допустимое отклонение $\Delta = 3.3$ К) термопарами 10 на разных по высоте уровнях (рис. 1) и составляла 1100 ± 50 К. Показания термопар записывались регистратором 3. Скорость движения ветра u_a контролировалась лопастным анемометром и не превышала 1.5–2 м/с.

Для создания массива сферической формы применялась резиновая оболочка (объем жидкости V в оболочке варьировался в диапазоне 50–1000 ml). Аналогично экспериментам [8] вода заливалась в баллон, в котором создавалось постоянное избыточное давление $P \approx 2 \cdot 10^5$ Pa. Процесс заполнения водой оболочки продолжался до тех пор, пока не достигался требуемый начальный объем „ядра“. Для контроля генерируемого баллоном объема жидкости использовалась нанесенная на него мерная шкала, а также электронные весы (подготовленные „ядра“ взвешивались в оболочках). Для каждого объема „ядра“ проводилось не менее 10 экспериментов. С применением одного модельного очага пожара выполнялось, как правило, от 7 до 13 экспериментов. Систематические погрешности измерения размеров снаряда не превышали 0.1 mm. Максимальные погрешности определения скоростей движения снаряда и отрывающихся фрагментов составили 0.05 м/с.

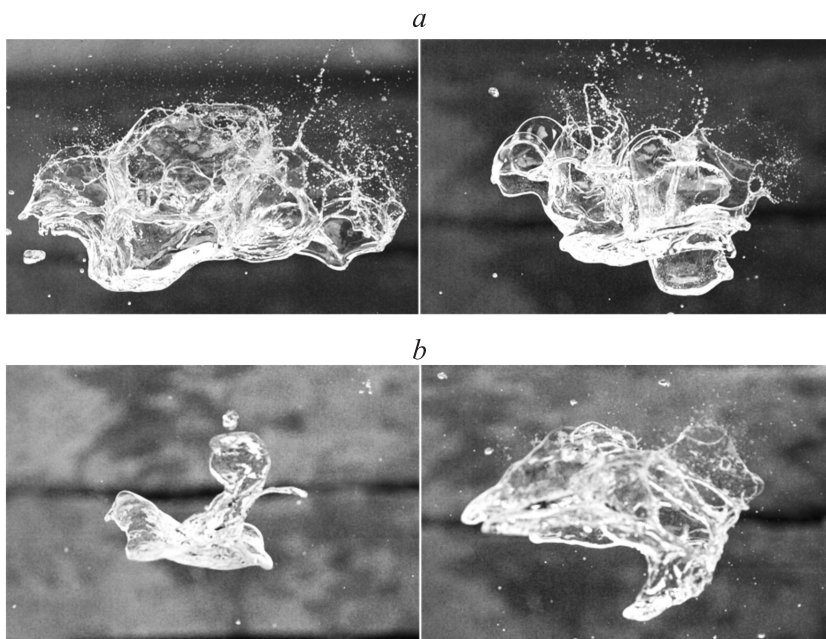


Рис. 2. Кадры видеogramм с изображениями водяного снаряда (исходный объем — 0,25 л) после прохождения им расстояния 2 м при движении: *a* — в воздухе с температурой 290–300 К; *b* — через высокотемпературные (1100 К) продукты сгорания.

При прохождении водяным массивом расстояния 2 м через высокотемпературные продукты сгорания (рис. 2, *b*) его размеры уменьшались в сравнении с умеренными температурами (рис. 2, *a*). Из анализа видеogramм можно заключить, что происходит интенсивное „сжатие“ снаряда при нахождении его в высокотемпературной зоне горения. Для анализа выделенной закономерности в рассмотрение введен параметр Δl :

$$\Delta l = (l_a - l_f) / l_a \cdot 100\%,$$

где l_a, l_f — характерные размеры водяного снаряда после прохождения расстояния 2 м в воздухе и через высокотемпературные продукты сгорания, мм.

Эксперименты показали, что с ростом начального объема снаряда (от 50 до 1000 ml) эффект „сжатия“ становится более выраженным (особенно на начальных стадиях трансформации). Так, значения параметра Δl в продольном и поперечном направлениях для снаряда с $V = 100$ ml составили 14 и 7% соответственно (при $V = 200$ ml — 28 и 16%, $V = 300$ ml — 36 и 19%, $V = 500$ ml — 41 и 20%). Анализ полученных видеogramм показал, что при $V = 500$ –1000 ml значения Δl составляют 40–50%. Выделенный эффект „сжатия“ обусловлен формированием буферного парового слоя между жидкостью и высокотемпературными продуктами сгорания в малой окрестности границы „снаряд–газы“. Интенсивный вдув паров жидкости в этот слой приводит к росту давления со стороны газов на снаряд. Как следствие, существенно замедляется процесс его трансформации и увеличения размеров при разрушении. Исследования [2] показали, что этот буферный слой в случае одиночных капель (особенно крупных — более 1 mm) существенно снижает тепловой поток, подводимый газами к жидкости, и, как следствие, уменьшается скорость испарения последней.

При проведении экспериментов установлено, что совместно со „сжатием“ массива существенно замедляются процессы его деформации и разрушения (по сравнению с умеренными температурами газов). Эта закономерность особенно заметно прослеживалась для массивов с начальным объемом $V = 500$ –1000 ml. Выявлено, что при движении через воздух с умеренными температурами снаряды объемом около 500 ml проходят все стадии трансформации за 0.6 s, а при движении через высокотемпературные продукты сгорания общая длительность стадий может достигать 0.7 s. Этот результат обусловлен ростом аэродинамических сил на снаряд при испарении жидкости (выделенный результат хорошо соответствует теории движения капель в условиях интенсивных фазовых превращений [10]). На рис. 3 приведены числа Вебера ($We = u^2 d \rho / \sigma$ [10], u — скорость движения снаряда, м/с; d — его максимальный поперечный размер, м; плотность газов с учетом соответствующей температуры в экспериментах: воздуха — $\rho = 1.181$ kg/m³, продуктов сгорания — $\rho = 0.315$ kg/m³; поверхностное натяжение воды на границе с воздухом $\sigma = 0.0727$ N/m и продуктами сгорания $\sigma = 0.0618$ N/m), соответствующие переходам между стадиями трансформации массива с $V = 500$ ml. Значения We для условий движения снаряда при высоких и умеренных температурах газов существенно отличаются. Они иллюстрируют соответствующие отличия аэродинамических сил, действующих на снаряд.

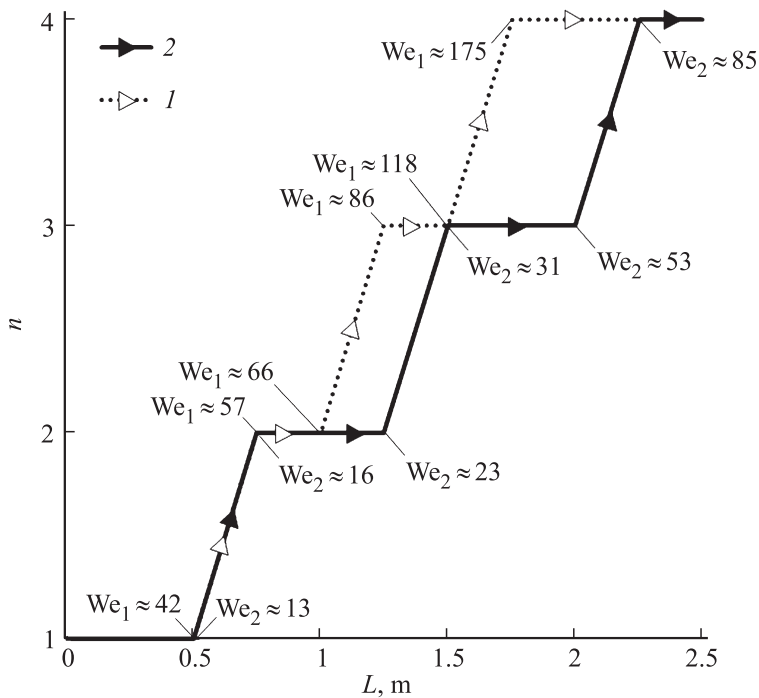


Рис. 3. Характерные переходы между стадиями разрушения (n — порядковый номер стадии) водяного снаряда (исходный объем — 500 ml) при движении: 1 — в воздухе с температурой 290–300 К; 2 — через высокотемпературные (1100 К) продукты сгорания.

Для оценки влияния компонентного состава снаряда на характеристики его трансформации проведены эксперименты с раствором на основе воды и частиц поваренной соли NaCl (относительная массовая концентрация 0–5%), а также суспензией, состоящей из воды и твердых углеродистых частиц (относительная массовая концентрация 0–1%, размеры частиц 100–500 μm). В случае растворов и суспензий установлено заметное замедление процессов трансформации и диспергирования массивов по сравнению с водой без примесей и включений. В частности, выявлено, что при увеличении массовой концентрации NaCl в воде до 5% переходы между стадиями трансформации за-

медляются (реализуются при больших протяженностях и временах полета массива). Этот эффект можно объяснить энергией связей между молекулами воды, которая в несколько раз возрастает при добавлении ионов Na^+ и Cl^- . Как следствие, для разрушения связей между молекулами массива раствора требуется аккумулятивное большее энергии по сравнению с водой. С ростом концентрации (до 1%) и размеров (от 100 до 500 μm) частиц углерода в массиве его разрушение также замедлялось. Это происходит, скорее всего, за счет аккумулятивного нерастворяющихся и обладающих большей (по сравнению с водой) плотностью частиц в нижней области „ядра“. Повышается эффективная вязкость и поверхностное натяжение. Как следствие, для разрушения массивов суспензий или растворов требуются большие (по сравнению с водой) силы со стороны внешней среды. Эффект „сжатия“ регистрировался во всех экспериментах с исследованными растворами и суспензиями. В случае добавления в воду углеродистых частиц он усиливался за счет интенсификации прогрева снаряда и его испарения (как следствие, роста размеров буферного парового слоя). Для растворов с частицами NaCl регистрировалось некоторое ослабление эффекта „сжатия“ по сравнению с водой без этих частиц. Это, скорее всего, обусловлено соответствующим снижением скорости парообразования при росте концентрации частиц NaCl [2].

Установленные особенности процессов разрушения массивов при движении через высокотемпературные продукты сгорания расширяют современные представления (в частности, [5–8]) о закономерностях трансформации жидкостных „ядер“. Они могут быть использованы при разработке перспективных технологий применения снарядов воды, растворов, эмульсий и суспензий на ее основе в системах пожаротушения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 14-39-00003).

Список литературы

- [1] McAllister S. // Fire Saf. J. 2013. V. 61. P. 200–206.
- [2] *Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Fire Saf. J. 2014. V. 70. P. 61–70.
- [3] *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 11–18.
- [4] *Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 3. С. 50–58.

- [5] *Мешков Е.Е., Орешков В.О., Янбаев Г.М.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 15. С. 79–86.
- [6] *Paruchuri S., Brenner M.P.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 134–502.
- [7] *Reyssat E., Chevy F., Biance A.L., Petitjean L., Quere D.* // Europhys. Lett. 2007. P. 34005.
- [8] *Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 20. С. 103–110.
- [9] *Janiszewski J.* // Metrol. Measur. Sys. 2012. V. 19. N 4. P. 797–804.
- [10] *Терехов В.И., Пахомов М.А.* Тепломассоперенос и гидродинамика в газоконденсатных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.