

03

## **Экспериментальное определение времени сохранения пониженной температуры парогазовой смеси в следе капель воды, движущихся через продукты сгорания**

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

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

Поступило в Редакцию 27 января 2016 г.

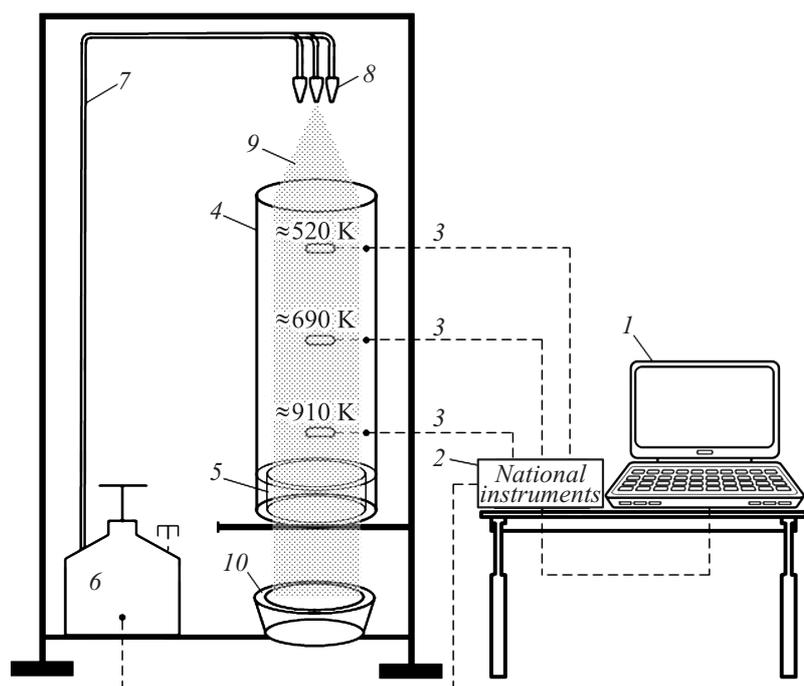
Представлены результаты экспериментальных исследований изменения во времени температуры газов в следе движущихся через продукты сгорания капель воды. Начальная температура газов составила 500–950 К. Исследованы аэрозоли с размерами капель от 40 до 400  $\mu\text{m}$ . Для визуализации движения капель во встречном потоке продуктов сгорания использован полый цилиндр из кварцевого стекла высотой 1 м и внутренним диаметром 0.15 м, кросскорреляционный комплекс и оптические методы Interferometric Particle Imaging (IPI), Shadow Photography (SP), Particle Tracking Velocimetry (PTV), Particle Image Velocimetry (PIV). Определены масштабы снижения температуры смеси продуктов сгорания и паров воды при импульсной (не более 1 с) и непрерывной подаче капель разных размеров. Установлены времена сохранения пониженной (относительно начальной) температуры в следе капель („температурного следа“ аэрозоля). Экспериментально обоснована гипотеза о причинах изменения температуры в следе капель при их перемещении через продукты сгорания.

При создании современных технологий пожаротушения с применением капельных потоков воды, эмульсий, растворов и суспензий на ее основе традиционно преследуются три основных цели [1-3]: снижение температуры в зоне горения при охлаждении водой (или другим хладагентом); вытеснение окислителя и подавление источника притока горючих газов, например продуктов термического разложения лесного горючего материала; поглощение (аккумуляция) энергии пожара эндотермическими фазовыми превращениями. Можно отметить довольно большую группу технологий с характерными названиями [1-3]: водяной туман, водяная завеса, тонкораспыленная вода и другие. Одной

из основных задач таких технологий принято считать снижение температуры в зоне горения или создание „тепловой защиты“ окружающих объектов (трубопроводов, резервуаров и др.). Но до настоящего времени нет физического обоснования условий снижения температуры в зоне горения за счет парообразования и аккумуляции теплоты „холодной“ водой. При этом на практике важно оптимизировать расход огнетушащей жидкости (например, в виде аэрозоля). Для этого целесообразно определение оптимальных диапазонов изменения основных характеристик капельных потоков для обеспечения требуемых температур в зоне пожара.

По результатам экспериментов [3–5] предложена технология распределенной во времени и пространстве подачи капель воды в зону пожара. Предполагается [3–5] применение последовательных рядов капель (импульсами) с разными размерами последних. По результатам моделирования [6–8] установлено, что температура в следе первой группы (своеобразного „эшелона“) капель может быть существенно (от 20–30 до 300–400 К) ниже, чем во фронте их движения, в течение продолжительного времени (до 10 с). При размерах капель 0.25–0.5 мм температура в следе снижается на 50–70 К, 0.5–1.5 мм — на 120–170 К, 1.5–3 мм — на 200–300 К относительно начальной температуры 1170 К [6–8]. Время восстановления температуры газов до 1170 К после прохождения капель воды через пламя с ростом их размеров изменялось от 3–4 до 8–10 с [6–8]. Как следствие, во многих случаях избыточна непрерывная подача капель в зону горения для снижения температуры газов. В [6–8] показана теоретическая возможность обеспечения требуемых температур парогазовой смеси за счет периодического впрыска капель. Теоретические заключения [6–8] до настоящего времени экспериментально не обоснованы. Это обусловлено проблемами достоверной регистрации перемещения капель воды в высокотемпературных продуктах сгорания (определения положения фронта и размера следа при их движении в виде аэрозоля) и измерения температуры в следе водяного потока. Эксперименты [3–5] показали, что для решения этих задач целесообразно применять оптические методы (например, IPI, SP, PIV, PTV и другие), кросскорреляционные системы, а также малоинерционные термопары.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование изменений во времени температуры в следе капель воды, движущихся через продукты сгорания, для физического обоснования доминирующего механизма теплопереноса и фазовых превращений.



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: 1 — персональный компьютер; 2 — высокоскоростная плата аналогового ввода; 3 — термопары; 4 — цилиндр из жаропрочного кварцевого стекла; 5 — полый цилиндр с горючей жидкостью (горелка); 6 — емкость с водой; 7 — канал подачи воды; 8 — форсунка; 9 — аэрозоль; 10 — уловитель капель.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1. Для создания потока высокотемпературных продуктов сгорания применялись полый цилиндр (высота — 1 м, внутренний диаметр — 0,2 м) из жаропрочного кварцевого стекла 4 и специализированная горелка 5 также в форме цилиндра (высота — 0,1 м, внутренний и внешний диаметры — 0,15 и 0,19 м соответственно). В качестве горючей жидкости использовалось топливо с хорошо изученными свойствами — керосин (марки ТС-1).

Для генерации капель распыленной воды применялись баллон 6 (вода находилась под давлением 100–300 кПа), канал 7 и распылительная

форсунка 8. Использовались три типа форсунок, генерирующих различные по дисперсности (радиусам) капли:  $R_d = 80\text{--}350$ ,  $R_d = 60\text{--}180$ ,  $R_d = 40\text{--}120\ \mu\text{m}$ . Применены две схемы распыления воды в зону горения: непрерывная подача большой совокупности капель (до полного прекращения горения); импульсный распыл (время импульса — 1 s, интервал между импульсами — 30 s).

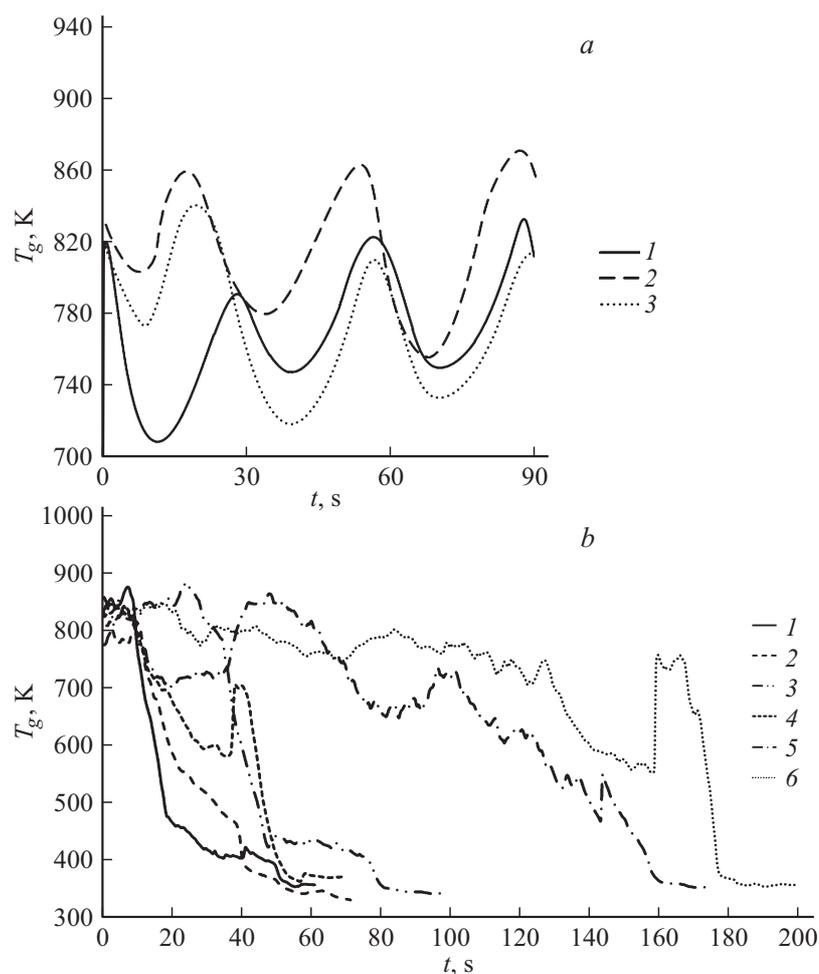
В каждом эксперименте внутреннее пространство горелки 5 заполнялось керосином в объеме  $250\ \mu\text{l}$ . Инициировалось его зажигание. В трех (по высоте) точках (0,3, 0,6, 0,9 m) цилиндра 4 размещались малоинерционные (хромель-алюмелевые, диапазон измеряемых температур 273–1473 K, систематическая погрешность  $\pm 3$  K, инерционность не более 0,1 s) термопары 3. За счет регулирования притока воздуха в горелку выдерживалось идентичное начальное температурное поле в цилиндре 4. Температуры продуктов сгорания изменялись в среднем от 910 K (у основания горелки) до 520 K (на выходе из цилиндра 4). После достижения требуемых начальных температур газов осуществлялся ввод аэрозоля (распыл воды) во внутреннюю полость цилиндра 4. Регистрировались изменения температуры продуктов сгорания, а также положение фронта и размеры следа аэрозоля. Для определения температуры газов и парогазовой смеси одновременно использовались три термопары 3. Это позволило в каждом эксперименте контролировать начальную (до впрыска аэрозоля) температуру продуктов сгорания в соответствующих сечениях цилиндра 4 ( $910 \pm 15$ ,  $690 \pm 10$ ,  $520 \pm 7$  K). Каждое из этих значений соответствовало показаниям одной из трех термопар. Перемещение капель в потоке продуктов сгорания контролировалось методами SP и PTV [3–5]. В каждом эксперименте с аэрозолем обрабатывались результаты измерений только одной термопары (т.е. анализ проводился для одной начальной температуры газов —  $910 \pm 15$ ,  $690 \pm 10$  или  $520 \pm 7$  K). Определялись значения изменения температур ( $\Delta T_g$ ) относительно начальных (до момента прохождения каплями сечений, в которых устанавливались термопары). Контроль  $\Delta T_g$  позволял вычислить времена сохранения пониженных (относительно начальных) температур ( $\tau$ ) продуктов сгорания в следе капель. Систематическая погрешность определения времен  $\tau$  не превышала 2 s.

Средства (лазеры, видео- и фотокамеры, синхронизаторы, трассирующие частицы, прожекторы и др.) высокоскоростной кросскорреляционной видеорегистрации аналогичны применяемым в опытах [3–5]. Слежение за перемещающимися каплями (для определения границы раздела

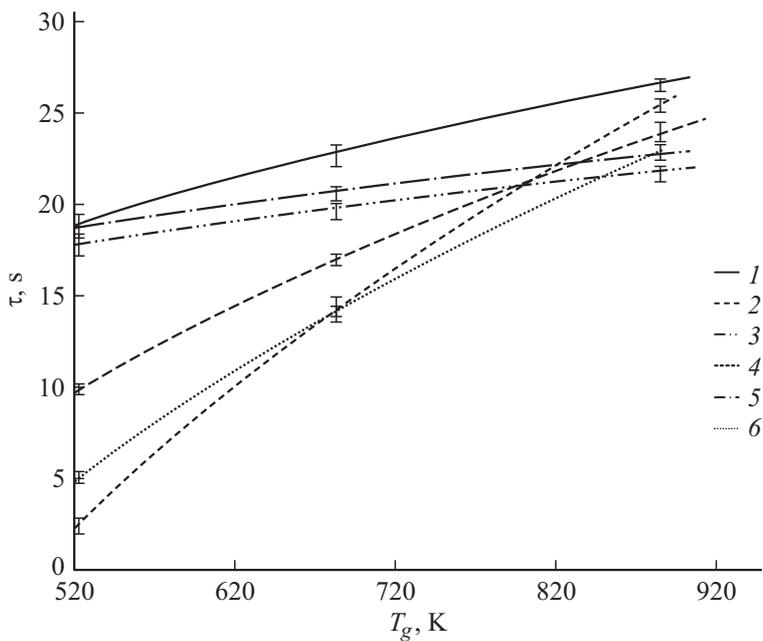
сред при вычислении времени сохранения относительно холодного „температурного следа“) проводилось с применением программного обеспечения Tema Automotive [9]. Размеры, скорости и траектории перемещения капель и продуктов сгорания определялись с применением панорамных методов (PIV, PTV, IPI, SP) [10,11]. Аналогично экспериментам [3–5] в данной работе систематические погрешности определения размеров (радиусов)  $R_d$  и скоростей перемещения ( $U_d$ ) капель составили 3.2 и 2.5%. Средняя скорость движения продуктов сгорания ( $U_g$ ) в цилиндре 4 равна 1.5 m/s.

Проведенные эксперименты показали существенно отличающиеся распределения во времени температуры смеси продуктов сгорания и паров воды при импульсной и непрерывной подаче аэрозоля (рис. 2). При непрерывном вдуве капель во всех экспериментах температура газов устойчиво снижалась. Немонотонности трендов на рис. 2, *b* обусловлены соответствующими изменениями концентраций компонентов смеси продуктов сгорания и паров воды (вследствие фазовых превращений). В этом случае независимо от размеров капель (мелкий, средний и крупный распыл) важную роль при снижении температуры газов играет теплообмен с относительно „холодной“ водой. Чем больше размер капель, тем заметнее вклад данного механизма в снижение температуры. Полученный результат подтверждают данные дополнительных экспериментов, проведенных с предварительно нагретой водой ( $T_w \approx 340$  K). В опытах [3] установлено, что скорости испарения предварительно подогретых (до 340–370 K) капель на 15–25% выше скорости капель с температурой 290–300 K. Как следствие, можно было ожидать интенсификации испарения в проведенных экспериментах и снижения температуры продуктов сгорания. Но на рис. 2, *b* видно обратное. При использовании капель с  $T_w \approx 340$  K температуры продуктов сгорания снижаются менее масштабно и более длительно. Этот результат иллюстрирует, что непрерывная подача капельного потока воды в зону горения не приводит к значительной интенсификации парообразования. Капли последовательно попадают в газовую среду с уменьшающейся во времени температурой (скорость испарения каждой последующей капли снижается в несколько раз [7,8]). В таких условиях теплообмена значения  $T_g$  определяются скоростью движения и размерами границ раздела.

При импульсном впрыске капель экспериментально установлена возможность поддержания относительно холодного „температурного



**Рис. 2.** Изменение температуры продуктов сгорания при прохождении через него капле воды при импульсной (а): 1 —  $0.08 < R_d < 0.35$  mm, 2 —  $0.06 < R_d < 0.18$  mm, 3 —  $0.04 < R_d < 0.12$  mm; и непрерывной (б): 1 —  $0.08 < R_d < 0.35$  mm ( $T_w \approx 300$  K), 2 —  $0.08 < R_d < 0.35$  mm ( $T_w \approx 340$  K), 3 —  $0.06 < R_d < 0.18$  mm ( $T_w \approx 300$  K), 4 —  $0.06 < R_d < 0.18$  mm ( $T_w \approx 340$  K), 5 —  $0.04 < R_d < 0.12$  mm ( $T_w \approx 300$  K), 6 —  $0.04 < R_d < 0.12$  mm ( $T_w \approx 340$  K) подаче воды.



**Рис. 3.** Характерные времена сохранения пониженной температуры в следе аэрозоля при разных начальных температурах продуктов сгорания и размерах капель: 1 —  $0.08 < R_d < 0.35$  mm ( $T_w \approx 300$  K), 2 —  $0.08 < R_d < 0.35$  mm ( $T_w \approx 340$  K), 3 —  $0.06 < R_d < 0.18$  mm ( $T_w \approx 300$  K), 4 —  $0.06 < R_d < 0.18$  mm ( $T_w \approx 340$  K), 5 —  $0.04 < R_d < 0.12$  mm ( $T_w \approx 300$  K), 6 —  $0.04 < R_d < 0.12$  mm ( $T_w \approx 340$  K).

следа“ в течение продолжительного времени (рис. 2, а). Соответственно дискретной подачей капель можно снижать температуру  $T_g$  при существенно (кратно) меньшем объеме воды, чем при непрерывной подаче. В этом случае влияние подогрева воды и размеров капель в аэрозоле становится значительным. Соответствующие процессы и определяют снижение времен  $\tau$  (рис. 3) при росте  $T_w$  и уменьшении  $R_d$ . Кросскорреляционная видеорегистрация позволила объяснить полученные результаты интенсивным торможением и уносом (в обратном направлении) капель воды. Уменьшение их начального размера  $R_d$

и предварительный подогрев воды приводили к более быстрому испарению капель (аналогично [3–5]). Как следствие, возрастала сила сопротивления, обусловленная движением встречного потока продуктов сгорания. Капли разворачивались в потоке газов и продолжали двигаться в обратном направлении. Но такие капли при интенсификации испарения окружаются (показано при численном моделировании [7,8]) паровым слоем („тепловой защитой“), который снижает тепловой поток к поверхности капли и ограничивает рост скорости испарения. Казалось бы, этот фактор должен уменьшить вклад парообразования в процесс снижения температуры газов. Но при сравнении времен сохранения относительно холодного „температурного следа“ на рис. 3 установлен другой физический эффект. При относительно малых (менее 600 К) температурах газов влияние процесса испарения на снижение  $T_g$  существенно слабее (времена восстановления  $\tau$  отличаются в несколько раз), чем движения „холодной“ воды. Для высокотемпературных газов зарегистрированы сопоставимые масштабы влияния этих двух механизмов снижения  $T_g$ . В частности, на рис. 3 видно, что времена сохранения „температурного следа“ для аэрозолей с разной дисперсностью капель и начальной температурой жидкости сопоставимы (22–25 s). Этот результат показывает, что снижение температуры в зоне горения можно обеспечить при импульсной подаче капель воды за счет разных физических эффектов (движения „холодной“ жидкой фазы в виде крупных капель при минимальном испарении; впрыска предварительно подогретой воды; ввода мелкодисперсного капельного аэрозоля).

Таким образом, выполнено экспериментальное обоснование сформулированной по результатам теоретических исследований [6–8] гипотезы о возможности довольно продолжительного (от 3–5 до 10–15 s) сохранения относительно холодного „температурного следа“ капель при движении через высокотемпературные продукты сгорания. Впервые экспериментально установлены времена сохранения таких зон относительно низких температур при варьировании размеров капель и способа их подачи. Установленные значения падения температуры газов в следе отличаются (превышают) от теоретических [6–8] при соответствующих начальных  $T_g$  на 15–20%, времена сохранения „температурного следа“ больше, чем по моделям [6–8], на 11–14% (чем больше размер капель, тем значительнее отклонения). Это обусловлено, скорее всего, тем, что в моделях [6–8], использовалось уравнение равноускоренного движения капель при относительно малой скорости встречного движения газов

(0.5 m/s). В проведенных экспериментах скорости газов несколько менялись и составляли в среднем около 1.5 m/s. Капли двигались медленнее относительно теории [6–8], испарялись интенсивнее и след сохранялся длительнее. Выделенные закономерности расширяют современные представления о процессах фазовых превращений в двухфазных высокотемпературных газопарокапельных потоках [12].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (14-39-00003).

## Список литературы

- [1] *Xiao X.K., Cong B.H., Wang X.S., Kuang K.Q.* et al. // *J. Fire Sci.* 2011. V. 29. № 4. P. 339–360.
- [2] *McAllister S.* // *Fire Saf. J.* 2013. V. 61. P. 200–206.
- [3] *Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // *Fire Saf. J.* 2014. V. 70. P. 61–70.
- [4] *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2014. Т. 40. В. 12. С. 11–18.
- [5] *Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2015. Т. 41. В. 20. С. 103–110.
- [6] *Strizhak P.A.* // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2013. V. 86. N 4. P. 895–904.
- [7] *Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2013. V. 86. N 6. P. 1413–1418.
- [8] *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // *ПМТФ.* 2015. Т. 56. № 4. С. 1–13.
- [9] *Janiszewski J.* // *Metrol. Measur. Sys.* 2012. V. 19. N 4. P. 797–804.
- [10] *Simo Tala J.V., Russeil S., Bougeard D., Harion J.-L.* // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2013. V. 50. P. 45–53.
- [11] *Damaschke N., Nobach H., Tropea C.* // *Exp. Fluids.* 2002. V. 32. N 2. P. 143–152.
- [12] *Терехов В.И., Пахомов М.А.* *Тепломассоперенос и гидродинамика в газопарокапельных потоках.* Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.