

03

Определение температуры газов при прохождении через них водного аэрозоля

© И.С. Войтков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак[¶]

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

[¶] E-mail: pavelspa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 14 октября 2016 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов изменения температуры газов при импульсном впрыске аэрозоля воды, раствора NaCl и суспензии глины. Начальная температура газов составляла 520–910 К. Используются аэрозоли с размерами капель от 40 до 400 мкм. Для визуализации движения последних во встречном потоке продуктов сгорания используются панорамные оптические методы. Установлено влияние на процесс охлаждения газов дисперсности аэрозоля, концентрации NaCl и глины в растворах и суспензиях, а также условий впрыска жидкости.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.06.44403.16525

Исследования физических и химических процессов, а также фазовых превращений, протекающих при взаимодействии огнетушащих веществ и материалов с очагами возгораний и пожаров [1–3], позволяют сделать заключение о том, что задачи борьбы с пламенем в зоне горения и непосредственно очагами термического разложения целесообразно разделять. Наибольшую эффективность борьбы с пожарами можно обеспечить при создании специфических условий как снижения температуры в зоне горения, так и прекращения термического разложения горючих веществ и материалов [1–3]. Снижение температуры в зоне горения при тушении любого пожара (особенно лесного) представляет первостепенную задачу, так как ее решение позволяет существенно упростить борьбу с очагом возгорания в целом. Предложенная по результатам экспериментов [4,5] и моделирования [6,7] технология применения распределенных во времени и пространстве капельных потоков жидкостей, эмульсий и суспензий ориентирована на максимальное снижение температуры в зоне горения за счет поглощения теплоты ис-

парения. Однако до настоящего времени не исследованы в полной мере механизмы физических процессов, определяющих динамику снижения температуры, и не определены характерные времена ее восстановления после прохождения через пламя водных аэрозолей.

Использование известных моделей тепломассопереноса [8,9] для изучения условий теплообмена каплей жидкости (в частности, воды) с газовой средой не позволяет в полной мере определить характеристики испарения при температуре газов более 600 К [10]. Использование балансных соотношений вида $Q_e W_e = \alpha(T_g - T_s)$ (Q_e — теплота парообразования, J/kg; W_e — массовая скорость испарения, kg/(m² · с); α — коэффициент теплообмена, W/(m² · К); T_g, T_s — температуры газов и поверхности капли, К) на основании предположения о том, что вся подведенная к поверхности капли жидкости энергия расходуется на ее испарение [8,9], приводит к значениям скоростей испарения, в несколько раз отличающимся от экспериментальных [10]. Поэтому в случае применения выражений Рэнца–Маршала вида $Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$ (Nu, Re, Pr — числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля) [8,9] сложно прогнозировать условия и характеристики теплообмена в зоне горения (температура может достигать 1200–1500 К) при подаче капельных потоков жидкостей. Результаты моделирования [6,7] показали, что температуру в зоне горения можно довольно существенно (на несколько сотен градусов) снизить даже при импульсной подаче малых (менее 1 мм) групп капель (2–5 pcs). При этом выдвинута гипотеза [6,7] о том, что в большей мере снижение T_g определяется эндотермическими фазовыми превращениями, а не условиями охлаждения газов за счет теплообмена с жидкостью и аккумуляцией теплоты. Целесообразно, кроме анализа изменения T_g , сравнить времена сохранения пониженных температур газов после прохождения через них аэрозольных потоков (важны такие оценки для условий высоких начальных температур газов, в частности, продуктов сгорания).

Цель работы — экспериментальное определение характеристик процесса изменения температуры продуктов сгорания после прохождения через них аэрозоля жидкости.

Для генерации аэрозоля применялись: емкость с жидкостью под давлением 100–300 кПа и распылительная форсунка (радиусы капель $R_d = 40–400 \mu\text{m}$, концентрация $\gamma \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ drops/m}^3 \text{ gas}$, длительность импульса 1 с). Использовались: дистиллированная вода, раствор

NaCl (частицы размерами менее $10\ \mu\text{m}$ растворялись в воде аналогично опытам [4,5]), суспензия глины (частицы размерами менее $5\ \mu\text{m}$).

Для создания потока высокотемпературных продуктов сгорания применялись полый цилиндр (высота — 1 m, внутренний диаметр — 0.2 m) из жаропрочного кварцевого стекла и горелка [4,5] в форме цилиндра (высота — 0.1 m, внутренний и внешний диаметры — 0.15 и 0.19 m). В каждом эксперименте внутреннее пространство горелки заполнялось керосином в объеме 250 ml. Иницировалось его зажигание. В трех (по высоте) точках (0.3, 0.6, 0.9 m) цилиндра размещались хромель-алюмелевые термопары (диапазон измеряемых температур 273–1473 K, погрешность $\pm 3\ \text{K}$, инерционность не более 0.1 s). За счет регулирования притока воздуха в горелку выдерживалось идентичное начальное температурное поле газов. Температура продуктов сгорания изменялась в среднем от 910 K (у основания горелки) до 520 K (на выходе из цилиндра с газами). После достижения требуемых начальных температур газов осуществлялся впрыск аэрозоля во внутреннюю полость цилиндра. Регистрировались изменения температуры парогазовой смеси в точках расположения термопар (T'_g), а также положение аэрозольного облака.

Применение для определения температуры газов трех термопар обеспечивало возможность в каждом эксперименте контролировать начальную (до впрыска аэрозоля) температуру газов в соответствующих сечениях канала (910 ± 15 , 690 ± 10 , $520 \pm 7\ \text{K}$). Определялись изменения температур ($\Delta T_g = T_g - T'_g$) относительно начальных T_g (до момента прохождения каплями сечений с термопарами). Контроль ΔT_g позволял вычислить времена сохранения пониженных температур (τ) газов после прохождения аэрозоля. Систематическая погрешность определения τ не превышала 1 s.

Основные средства высокоскоростной кросскорреляционной видеорегистрации аналогичны применяемым в опытах [4,5]. Слежение за перемещающимися каплями (для определения границы раздела сред при вычислении времен τ , которые в работах [6,7] обозначены как „времена сохранения температурного следа капель“) проводилось с применением программного обеспечения Tema Automotive [4,5]. Зоной пониженных температур газов считалась область с температурой T'_g ниже начальной T_g не менее чем на 10 K. Скорости и траектории перемещения объектов регистрации определялись с применением панорамных методов (PIV, PTV, IPI, SP) [4,5]. Систематические погрешности

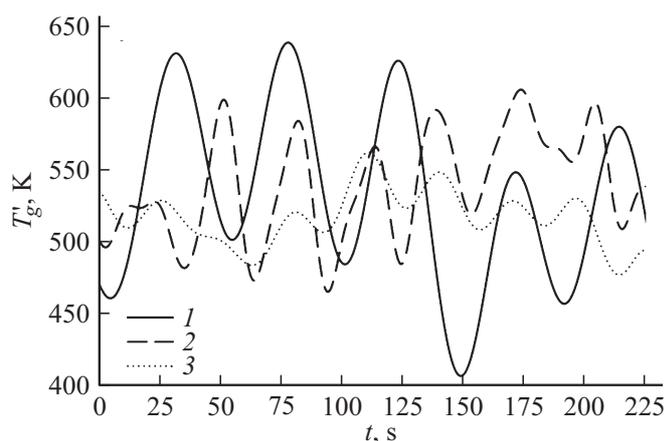


Рис. 1. Графики изменения температуры газов после прохождения через них аэрозоля воды (1), раствора NaCl (2) и суспензии глины (3) при размерах капель $R_d = 0.06\text{--}0.18$ mm.

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 была около 1.5 m/s.

На рис. 1 приведены зависимости, иллюстрирующие изменение температуры газов (T'_g) при прохождении через них аэрозоля. Максимальные значения температуры соответствуют моменту импульсного впрыска капель ($T'_g \approx T_g$). Эксперименты показали, что время движения аэрозоля от верхнего входного сечения канала с газами до первой термопары составляло около 0.14 s, второй — 0.19 s, третьей — 0.28 s (времена растут за счет торможения капель газами). Наибольшее снижение температуры T'_g зарегистрировано в экспериментах с водой (рис. 1), меньшее снижение T'_g соответствует раствору NaCl.

На рис. 2 представлены зависимости времени (τ) сохранения (восстановления температуры T'_g до значений T_g) пониженных температур газов после впрыска аэрозоля воды, раствора NaCl и суспензии глины при разных начальных размерах капель. Видно, что чем больше R_d , тем более длительное время сохраняются пониженные температуры T'_g . Полученный результат обусловлен тем, что уменьшение R_d приводило

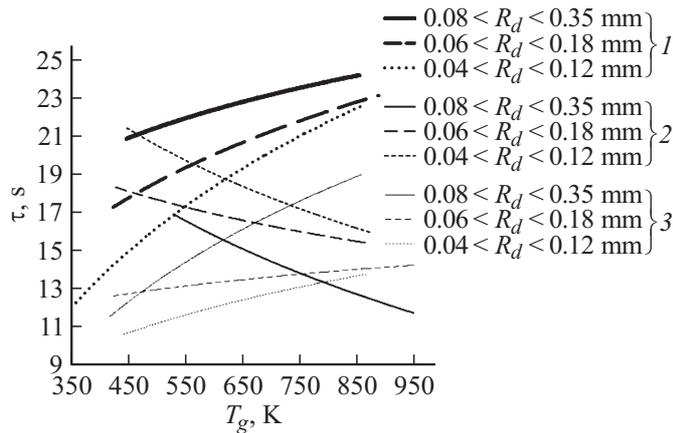


Рис. 2. Аппроксимационные значения времен сохранения пониженных температур газов после прохождения аэрозоля воды (1), раствора NaCl (2) и суспензии глины (3) при разных размерах капель и начальной температуре газов.

к росту скорости испарения [4,5] и соответственно интенсивности вдува паров во внешнюю по отношению к каплям среду. Как следствие, возрастала сила сопротивления, обусловленная движением встречного газового потока. Капли разворачивались и двигались в обратном направлении.

Установлено (рис. 2), что для капель раствора NaCl характерно явно выраженное снижение значений τ с ростом начальных температур газов (особенно выше 650 К). При этом изменяется наклон кривых $\tau(T_g)$ на рис. 2 в противоположную (относительно воды) сторону. Также меняется их расположение относительно друг друга при сравнении размеров капель. Такой эффект можно объяснить с использованием результатов опытов [5]. С ростом массовой доли NaCl в растворе до 5% скорости испарения капель (характеризуются параметром ΔR [5]) снижаются на 10–20% [5]. Образуется меньшее количество паров. Влияние данного механизма снижения температуры газов становится менее значимым. Очевидно, что при высоких температурах на величину T'_g определяющее влияние оказывает скорость испарения, которая для капель воды с примесью NaCl существенно ниже [5].

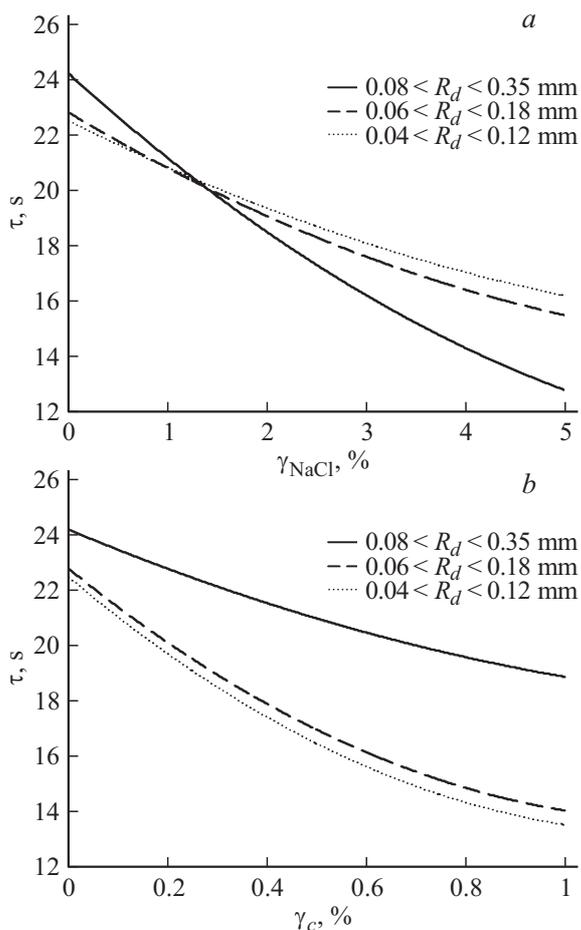


Рис. 3. Аппроксимационные значения времен сохранения пониженных температур газов (начальное значение $T_g \approx 850$ К) после прохождения аэрозоля при разных размерах капель, концентрации NaCl (a) и частиц глины (b).

В то же время при относительно умеренных температурах газов (менее 600 К) зарегистрированы практически сопоставимые значения τ для воды и раствора NaCl (рис. 2). Это связано с тем, что при таких T_g

капли при прохождении ими канала (времена составили менее 0.5 s) не успевают прогреться до температур интенсивного парообразования. Испарение протекает с малой скоростью. В данном случае снижение температуры T'_g обеспечивается главным образом за счет аккумуляции теплоты относительно холодной жидкостью, раствором или суспензией. В этих условиях капли раствора NaCl, скорость испарения которых меньше по сравнению с водой, способны пройти большие расстояния. По мере продвижения через продукты сгорания капли, уменьшаясь в размерах до 0.1 mm, затормаживаются, разворачиваются и двигаются в противоположном направлении. При этом капли, поверхность которых уже предварительно нагрета до температур интенсивного парообразования, продолжают испаряться. Мелкие ($R_d = 0.04-0.12$ mm) капли воды испаряются быстрее, чем раствора NaCl, которые, продолжая свое движение в потоке газов, еще на некоторое время обеспечивают сохранение пониженных (относительно начальных) значений температур T_g . Поэтому при низких T_g (менее 600 K) времена τ для раствора NaCl превышают аналогичные значения для воды на 2–5 s.

При воздействии на продукты сгорания каплями суспензии глины времена τ снижались в среднем на 3–9 s по сравнению с аналогичными значениями для воды. При добавлении частиц глины в капли воды интенсивность прогрева последних и испарения значительно возрастала. Известно [4], что добавление твердых частиц различных материалов приводит к интенсификации прогрева суспензии по сравнению с водой. Этот фактор приводил к росту скоростей парообразования и увеличению расходуемой на испарение энергии. Но после испарения пленки жидкости с поверхности частичек глины последние нагревались за счет кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена с газами (за счет большей теплопроводности, температуропроводности и поглощения излучения частички глины прогревались быстрее воды; вокруг них, в отличие от капель, не формировался слой паров, существенно замедляющий движение и снижающий конвективные тепловые потоки). Температура газов после прохождения через них аэрозоля суспензии увеличивалась относительно опытов с водой. С ростом концентраций частиц глины и NaCl выделенные особенности становились более выраженными (рис. 3).

Таким образом, эксперименты показали определяющую роль процесса испарения при формировании температурного поля газов после прохождения через них аэрозоля. Выделенные особенности для воды,

а также раствора и суспензии на ее основе показали специфику применения разных составов для снижения температуры в зоне горения.

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

Список литературы

- [1] *Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А.* и др. // ФГВ. 2010. Т. 46. № 1. С. 20–25.
- [2] *Wu W., Yang L., Gong J.* et al. // J. Fire Sci. 2011. V. 29. N 5. P. 465–475.
- [3] *Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Shvartsberg V.M.* et al. // Fire Safety J. 2012. V. 51. P. 102–109.
- [4] *Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Fire Saf. J. 2014. V. 70. P. 61–70.
- [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] *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 4. С. 1–13.
- [8] *Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч.* // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 5. С. 829–836.
- [9] *Терехов В.И., Пахомов М.А.* Теплоперенос и гидродинамика в газопельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.
- [10] *Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 1. С. 133–142.