

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 536.4

Особенности испарения двух капель воды, движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания*

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: pavelspa@tpu.ru

Проведено экспериментальное исследование интенсивности испарения капель в потоке распыленной жидкости при движении через пламя фиксированной высоты. Установлены интегральные характеристики испарения распыленной жидкости. Проанализированы особенности испарения двух движущихся последовательно через высокотемпературные продукты сгорания капель воды. Выполнено сопоставление полученных результатов с известными теоретическими следствиями.

Ключевые слова: испарение, тепломассоперенос, высокотемпературные продукты сгорания, распыленная вода, методы диагностики двухфазных потоков.

При выполнении численных исследований [1, 2] установлено, что капли в потоке распыленной жидкости в процессе движения через типичные высокотемпературные газы — продукты сгорания — значительно влияют на условия испарения движущихся за ними капель. Рассмотрены системы с двумя каплями, движущимися последовательно и параллельно, четырьмя и пятью, перемещающимися в шахматном порядке, а также другие комбинации. Построены изотермы, изолинии концентраций водяных паров и продуктов сгорания в окрестности зоны фазового перехода. Определены максимальные расстояния между каплями, при которых влияние предыдущих на условия испарения последующих минимально. Установлено, что влияние этого фактора особенно существенно при последовательном движении капель в потоке [2]. Результаты [1, 2] представляют интерес с точки зрения анализа процессов смешения парок капельных и газовых потоков [3, 4], но не верифицированы экспериментально. Целесообразно провести экспериментальное исследование испарения движущихся через высокотемпературные продукты сгорания друг за другом капель в потоке распыленной жидкости с использованием оптических методов диагностики газо- и парожидкостных смесей.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном исследовании влияния капель распыленной жидкости на интегральные характеристики испарения последующих капель, движущихся через высокотемпературные продукты сгорания.

При проведении экспериментов использовались установка (рис. 1) и методики [5]. Потоки распыленной жидкости (воды с примесью 0,5 % «трассирующих» частиц нанопорошка диоксида титана) с заданной скоростью и размерами капель подавались

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-90703).

в цилиндрический канал 13 (высота 1 м, диаметр 0,3 м, толщина стенки 0,005 м), заполненный продуктами сгорания типичного жидкого топлива со стабильными свойствами — керосина. Температура газов в рабочем канале контролировалась с использованием трех хромель-копелевых термопар 15 и поддерживалась в пределах 1070 ± 30 К.

Изображения каплей потока распыленной жидкости регистрировались на входе и выходе из канала с продуктами сгорания (рис. 1). Аналогично экспериментам [5] вычислялись значения средних характерных размеров (радиусов) каплей R_{cp} , скоростей их движения v_{cp} и относительных концентраций в области видеокадра α_{cp} . В потоке распыленной жидкости размеры каплей изменялись в диапазоне $0,075 \leq R \leq 0,375$ мм. При обработке видеogramм для оценки изменения характеристик испарения каплей последние условно были разделены (по начальным размерам) на три группы: малые — $0,075 \leq R < 0,175$ мм; средние — $0,175 \leq R \leq 0,275$ мм; большие — $0,275 < R \leq 0,375$ мм.

При вычислении размеров и скоростей движения каплей воды использовались оптические методы «Particle Image Velocimetry» (PIV), «Particle Tracking Velocimetry» (PTV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI) [6, 7]. Для определения температуры продуктов сгорания применялась методика термопарных измерений [8]. Систематические погрешности измерения температуры газов в канале 13 (рис. 1) не превысили 2,5 К, скоростей движения каплей — 2 %, их размеров — 0,001 мм.

При обработке видеogramм экспериментов капли распыленной жидкости условно делились на три группы. Для соответствующих групп по установленным двухкомпонентным полям скоростей траассирующих частиц вычислялись средние значения скоростей движения каплей (см. табл.). Видно, что скорости движения каплей рассматриваемых групп существенно отличаются. Малые капли значительно замедляют движение относительно начальной скорости и практически полностью испаряются. Для средних по размерам каплей уменьшение v_{cp} после прохождения пламени высотой 1 м происходит на 35–40 %. Для каплей третьей группы (больших) значения v_{cp} уменьшаются на 15–17 % относительно начальных. Вследствие практически полного испарения малых каплей

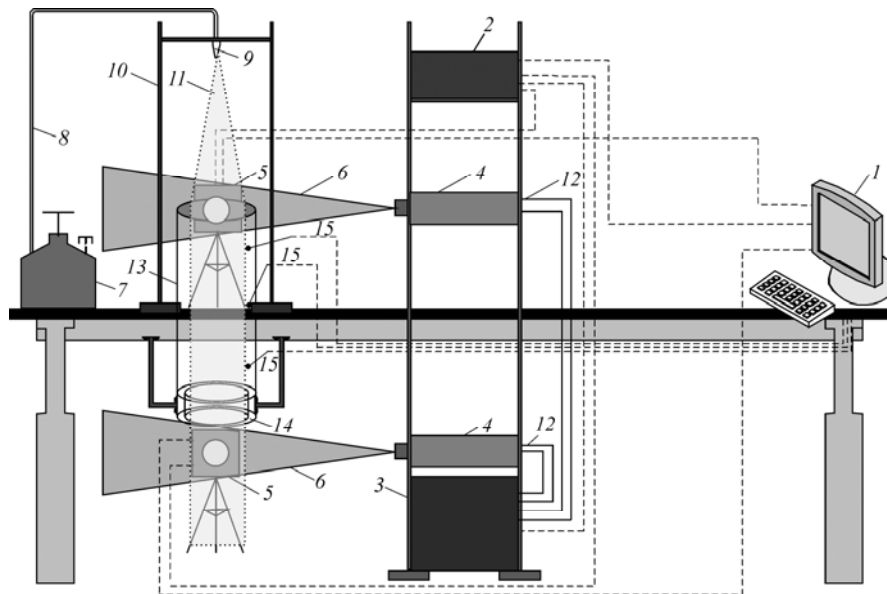


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — компьютер, 2 — синхронизатор кросскорреляционной камеры, лазера и компьютера, 3 — генератор лазерного излучения, 4 — двойной твердотельный импульсный лазер, 5 — кросскорреляционная камера, 6 — световой нож, 7 — емкость с рабочей жидкостью, 8 — рабочая жидкость, 9 — распылитель, 10 — штатив, 11 — капли рабочей жидкости, 12 — канал движения охлаждающей жидкости лазера, 13 — цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала, 14 — полый цилиндр, в межстеночное пространство которого залита горячая жидкость, 15 — термопары.

скорости соответствующих им трассиров близки к нулю. Эксперименты показали, что скорости больших и средних капель на выходе из зоны пламени варьируются в диапазоне 0,3–0,8 м/с. Поэтому при обработке полей скоростей выполнялись процедуры исключения векторов по абсолютным значениям v_m , не входящих в представленный диапазон.

Установленные диапазоны изменения скоростей капель воды (см. табл.) несколько отличаются от рассчитанных с использованием моделей [1, 2]. В экспериментах наблюдается существенное торможение капель восходящими продуктами сгорания. Численные исследования [1, 2] выполнены при допущении о неподвижности высокотемпературных газов. Полученные значения v_{cp} (см. табл.) иллюстрируют целесообразность развития моделей [1, 2] в направлении анализа влияния движения продуктов сгорания на интегральные характеристики испарения капель распыленной жидкости.

Выявленные значения R_{cp} для исследуемых групп капель на выходе из канала с продуктами сгорания (см. табл.) показывают, что при движении распыленной жидкости через высокотемпературную газовую среду происходит существенное изменение состава газопарожидкостной смеси. Малые капли практически полностью испаряются ($\alpha_{cp} \rightarrow 0$). Средние капли испаряются более чем на 45 %, большие — почти на 32 %.

На компонентный состав двухфазной газопарожидкостной смеси (суммарная α_{cp} для средних и больших капель на выходе из канала с пламенем практически составляет 100 %) существенно влияют траектории движения первых капель во фронте потока жидкости на последующие. Установлено, что вследствие интенсивного испарения идущих первыми капель значительно снижается скорость испарения и унос массы каждой из последующих. Этот результат хорошо согласуется с заключениями численных исследований [1, 2].

На рис. 2 приведено несколько типичных видеок кадров, полученных в серии опытов на выходе из канала 13 (рис. 1). Показаны тандемы капель на различном удалении друг от друга ($0,1R_{cp} < L < 15R_{cp}$). Видно, что чем меньше расстояние L между каплями, тем больше размер последующих капель (рис. 2, *a-d*). Аналогичная закономерность установлена и при движении нескольких тандемов капель на незначительном удалении друг от друга (рис. 2, *e, f*). В то же время из анализа видеок кадров экспериментов (рис. 2) можно отметить умеренное влияние параллельно движущихся капель.

При выполнении теоретических исследований [1, 2] также отмечалось незначительное (при $L > 0,5R_{cp}$) влияние двух параллельно движущихся капель на условия испарения каждой из них. Однако при $0,1R_{cp} < L < 0,5R_{cp}$ существенно уменьшалась скорость парообразования на их внутренних поверхностях (между двумя движущимися параллельно каплями) и возрастали времена «жизни» капель [1, 2]. В экспериментах выявить такие особенности при малых значениях (менее $0,5R_{cp}$) параметра L крайне сложно. Можно только заключить, что при $L > 0,5R_{cp}$ «совместное» влияние параллельно движущихся капель на условия их испарения в области высокотемпературных газов (рис. 2) достаточно умеренно.

Также на видеок кадрах (например, рис. 2, *e*) зарегистрировано проявление эффектов коагуляции — слияния предыдущих и последующих капель в тандеме (формирования объединенных капель). Установленную особенность можно объяснить существенным замедлением движения идущих первыми в тандеме капель при парообразовании и созданием условий (за счет снижения температуры в следе) для значительно менее

Таблица

Значения параметров испарения капель распыленной жидкости до и после области высокотемпературных продуктов сгорания

Наименование параметра	№ группы	На входе в канал	На выходе из канала
R_{cp} , мм	1	0,132	0
	2	0,215	0,114
	3	0,302	0,204
α_{cp} , %	1	44,27	0
	2	40,13	43,07
	3	15,47	56,93
v_{cp} , м/с	1	0,78	0
	2	0,79	0,48
	3	0,83	0,71

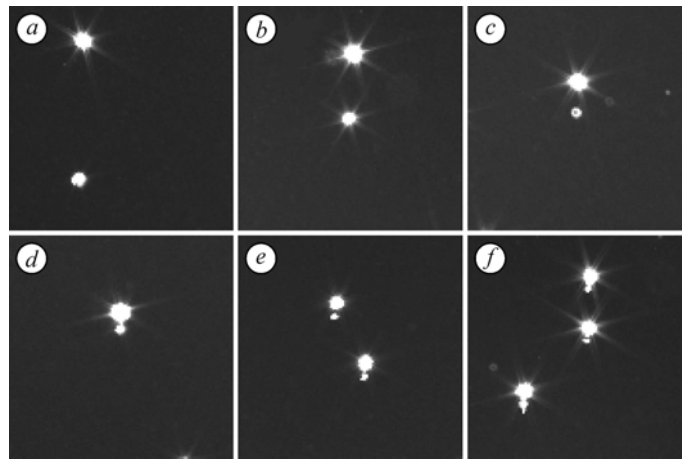


Рис. 2. Видеogramмы нескольких тандемов капель, полученные на выходе из зоны пламени в разных опытах (a-f).

интенсивного испарения каждой последующей. Идущие первыми капли практически останавливаются за счет встречного движения восходящих продуктов сгорания и интенсивного уноса массы при парообразовании, а последующие капли ускоряются (вследствие уменьшения скорости фазового перехода и температуры продуктов сгорания во фронте движения). В определенный момент времени эти капли достигают значительно испарившихся капель «лидеров» и далее продолжают движение объединенные капли (рис. 2, e). Этот процесс может продолжаться до полного испарения распыленной жидкости.

В результате обработки видеogramм установлено, что при удалении капель в некотором выделенном тандеме на расстоянии L более $(8-11)R_{cp}$ влияние капель «лидеров» на характеристики испарения последующих становится несущественным. При $L < (8-11)R_{cp}$ анализируемый фактор играет определяющую роль (рис. 2). При численном моделировании установлено [1, 2], что влияние капель «лидеров» на температуру и концентрацию продуктов сгорания в окрестности капель, идущих в следе, значительно при $L < (6-9)R_{cp}$. Полученные результаты позволяют сделать вывод о правомерности заключений [1, 2], подчеркивающих существенное влияние идущих первыми капель в потоке распыленной жидкости на условия испарения каждой последующей.

Список литературы

1. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандела» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4, № 12. С. 531–538.
2. Стрижак П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 8. С. 26–31.
3. Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газокapельной струей // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6, № 3. С. 331–341.
4. Терехов В.И., Пахомов М.А., Чичиндаев А.В. Влияние испарения жидких капель на распределение параметров в двухкомпонентном ламинарном потоке // Прикл. механ. и технич. физ. 2000. Т. 41, № 6. С. 68–71.
5. Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания // Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 35, № 9. С. 38–46.
6. Willert C.E., Gharib M. Digital particle image velocimetry // Experiments in Fluids. 1991. Vol. 10. P. 181–193.
7. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Sci. and Technology. 1997. Vol. 8. P. 1379–1392.
8. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 391 с.

Статья поступила в редакцию 8 июля 2013 г.,
после переработки — 7 октября 2013 г.