

03

Условия взрывного парообразования на границе раздела сред в неоднородной капле

© И.С. Ануфриев¹, Г.В. Кузнецов², М.В. Пискунов²,
П.А. Стрижак², М.Ю. Чернецкий¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: pavelspa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 18 марта 2015 г.

С использованием средств высокоскоростной (не менее 10^5 fps) видеорегистрации выделен эффект вскипания воды на границе раздела сред в неоднородной (содержащей углеродистую частицу) капле при ее нагреве в высокотемпературной (более 650 К) газовой среде. Выделены характерные стадии интенсивного испарения по внешнему контуру капли, формирования пузырьков на поверхности частицы, взрывного парообразования на границе раздела сред в капле и распада последней.

Развитие большой группы перспективных химических и энергетических газо- и паракапельных технологий (в частности, генерации теплоносителей на основе дымовых газов, воды и пара [1], термической очистки жидкостей [2], обработки зашлакованных поверхностей энергетического оборудования [3], полидисперсного пожаротушения [4]), сдерживается недостаточной [5,6] изученностью закономерностей фазовых превращений неоднородных (с включениями и примесями) капель воды в условиях интенсивного нагрева.

Эксперименты [7–9] позволили установить существенные отличия скоростей испарения однородных капель воды и с твердыми включениями (на примере углеродистых частиц) в высокотемпературных (около 1100 К) газах. Выявлена [7–9] интенсификация фазовых превращений капель жидкости при введении в них непрозрачных частиц. Установлено [7–9] влияние на характеристики испарения размеров в диапазоне 50–500 μm и относительной массовой концентрации таких частиц от 5 до 15%. По результатам анализа данных [7–9] сформулиро-

вана гипотеза о механизме испарения капли с твердыми включениями в условиях интенсивного нагрева, которая основана на предположении об интенсификации фазовых превращений не только на свободной поверхности капли, но и на границах раздела твердых частиц и воды. Для обоснования достоверности этой гипотезы и развития современных представлений о закономерностях фазовых превращений капель жидкости с включениями целесообразными являются экспериментальные исследования испарения одиночной капли с включением в условиях, соответствующих [7–9].

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование парообразования при нагреве неоднородной (с твердым включением) капли воды высокотемпературными газами.

Для проведения исследований использовался стенд (рис. 1), по основным элементам аналогичный экспериментам [7–9]. В отличие от опытов [7–9] выполнялась видеорегистрация процесса испарения неоднородной капли на стержне из изоляционного материала (керамики). Применялись две высокоскоростные (до 10^5 fps) видеокамеры 11, установленные на уровне капли, закрепленной в канале цилиндра 8 из кварцевого стекла (высота 1 м, внутренний и внешний диаметры — 0.2 и 0.206 м). Обработка кадров видеogramм выполнялась программным комплексом Tema Automotive.

В основании цилиндрического канала 8 располагалась горелка 9, в которую заливалась горючая жидкость, использовавшаяся для генерации высокотемпературных газов. Применялся технический спирт по причине меньшего дымовыделения по сравнению с керосином [7–9]. В цилиндре 8 выполнены 3 отверстия (на высоте 0.3, 0.5, 0.7 м относительно основания горелки 9) для хромель-алюмелевых термопар 7 (диапазон измеряемых температур 273–1373 К, погрешность измерения ± 4 К). Эти же отверстия использовались для ввода в канал 8 стержня 3 с подвешенной неоднородной каплей 4. Температура продуктов сгорания в экспериментах варьировалась в диапазоне 500–800 К.

Капля дистиллированной воды взвешивалась с использованием весов 1. Масса варьировалась в узком диапазоне 5–5.5 мг. Это позволяло получить характерные размеры неоднородной капли 3–4 мм после обволакивания включения. Толщина пленки жидкости вокруг последнего изменялась в пределах 0.2–0.6 мм. Капля с подложки весовой системы 1 наконечником дозатора 2 закачивалась в его выпускающий канал. Включение (углеродистая частица) 5 в форме диска (радиус 1 мм, высота 2 мм) изготавливалось с применением системы 6.

7* Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 16

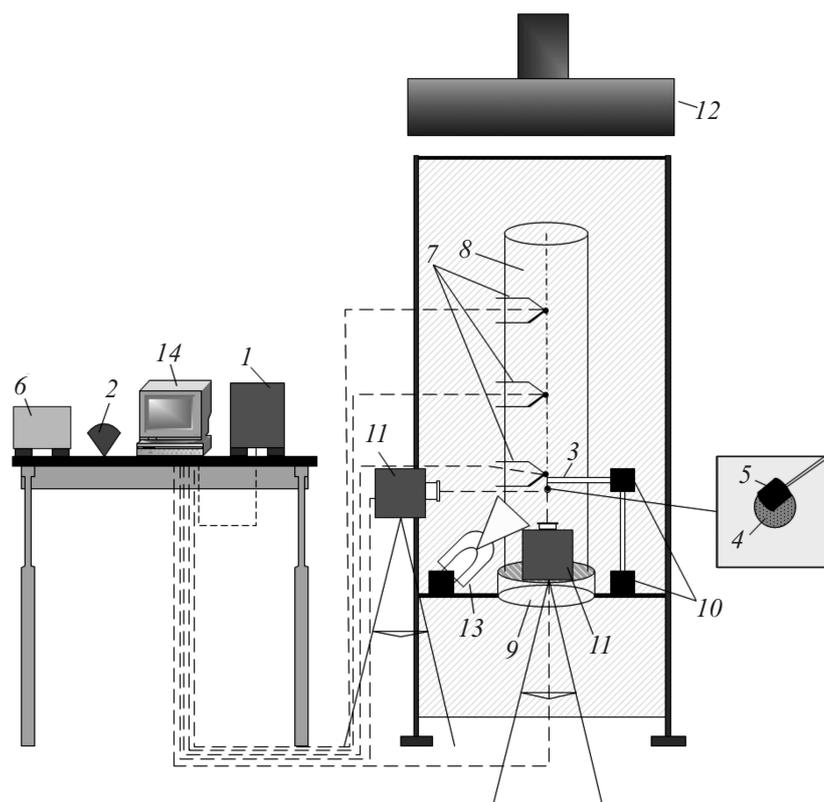


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — весы, 2 — дозатор, 3 — стержень (держатель включения), 4 — капля, 5 — включение, 6 — комплекс для изготовления включения, 7 — термопары, 8 — цилиндр из кварцевого стекла, 9 — горелка, 10 — передвижные механизмы, 11 — высокоскоростные камеры, 12 — нагнетательная система, 13 — прожектор, 14 — персональный компьютер (ПК).

В частице по оси симметрии выполнялось отверстие радиусом 0.15 mm и глубиной 0.3 mm. В глубине этого отверстия включение закреплялось на стержне 3 (длиной около 0.25 m). Стержень 3 фиксировался и перемещался по двум координатам (вдоль оси симметрии цилиндра 8 и перпендикулярно ей) с использованием передвижных элементов 10 (это

позволило помещать каплю с включением под углом 90° к направлению потока газов). На частицу наконечником дозатора 2 опускалась капля. С использованием камер 11 проводилась видеорегистрация испарения. С применением программного обеспечения Tema Automotive определялись размеры капли (максимальные размеры по трем координатам и вычислялся средний d) и толщины δ (на каждой грани частицы) пленки на включении, а также времена существования капли τ_h (нагрева до взрывного распада или полного испарения в виде единой капли). Погрешности средств измерения размеров включения, капли и толщины пленки не превышали 0.01 mm. Случайные погрешности определения d и δ составили не более 10% относительно среднего для серии при идентичных условиях. Погрешности определения времен τ_h не превысили 1 ms.

Установлено, что испарение капель жидкости с твердым включением в высокотемпературной газовой среде может происходить по двум схемам. Первая хорошо соответствует экспериментам [7–9] и включает интенсификацию прогрева воды за счет включения в капле с испарением только со свободной поверхности последней. В этом случае времена τ_h в несколько раз меньше, чем для однородных в аналогичных условиях [10]. Тем не менее эти времена, как правило, для капель с размерами не более 3 mm могут достигать и 10 s (при температурах газов выше 600 K). При уменьшении температуры газов до 500 K времена полного испарения даже неоднородных капель составляют несколько десятков секунд. Вторая схема характеризуется существенно меньшими (см. таблицу) временами существования капель τ_h (реализуется при более высоких температурах газов). Это связано не только с испарением со свободной поверхности капли, но и с взрывным парообразованием на внутренних границах раздела, приводящим к распаду на несколько капель.

Проведенные эксперименты позволили выделить временные стадии, характерные для второй схемы. На начальном (он является самым длительным — не менее $0.6\tau_h$) временном отрезке неоднородная капля прогревается и испаряется с внешней поверхности аналогично первой схеме. Вследствие снижения толщины пленки и аккумуляции доли подведенной энергии в малом приповерхностном слое воды у внутренних границ раздела сред в капле происходит зарождение пузырьков (практически по всей поверхности включения). В течение довольно короткого интервала времени (как правило, не более 0.5 s) пузырьки, всплывая через пленку жидкости, достигают свободной поверхности

Времена существования неоднородной (с углеродистой частицей) капли воды в высокотемпературной газовой среде при разных схемах парообразования (1 — без взрыва, 2 — со взрывом)

Средний размер капли	Температура газов				
	600 К	650 К	700 К	750 К	800 К
3 mm	Схема 1 $\tau_h = 12.9 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 6.9 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 3.7 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 2.6 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 2.2 \text{ s}$
4 mm	Схема 1 $\tau_h = 22.3 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 8.1 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 5.6 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 4.8 \text{ s}$	Схема 2 $\tau_h = 3.1 \text{ s}$

капли. При этом выявлено, что близко расположенные (соседние) пузырьки сливаются и формируются объединенные пузырьки с размерами, сопоставимыми с толщиной пленки жидкости. Это приводит к увеличению размеров капли и ее деформации относительно начальной конфигурации. Уменьшается характерная толщина пленки жидкости и, как следствие, ускоряется процесс ее прогрева. Выделенный эффект способствует как интенсификации испарения жидкости на свободной поверхности, так и кипению на внутренних границах раздела сред. При разбухании капли в результате быстрого (в течение 0.1–0.3 s) укрупнения пузырьков зарегистрировано ее взрывное разрушение. Формирующиеся при дроблении капли имеют существенно меньшие размеры (не более 0.25 mm). На поверхности включения после взрыва капли остается тонкий (как правило, менее 0.1 mm) слой жидкости, который в дальнейшем испаряется в режиме пузырькового кипения. Времена существования этого тонкого слоя не превысили в проведенных экспериментах 0.2–0.3 s. Как следствие, вторая схема развития процесса характеризуется общими временами τ_h не более нескольких секунд.

На рис. 2 приведены типичные кадры с изображением неоднородной капли в момент ввода в газовую среду и при взрывном распаде. Выполненные эксперименты показали, что в зависимости от массы жидкости последняя может обволакивать включение по-разному: относительно равномерно или стекать под действием гравитационных сил. При массе испускаемой жидкости до 7 mg она обволакивает включение (максимальные отклонения толщин пленок жидкости на разных

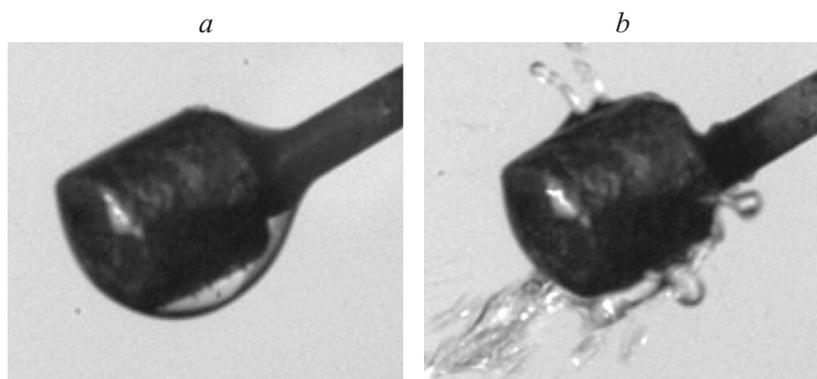


Рис. 2. Типичные видеogramмы (при температуре газов около 700 К) с неоднородной каплей (средний размер около 3 мм) в начальный момент времени (*a*) и при взрывном распаде (*b*).

поверхностях включения не превышали 0.2 мм относительно среднего значения). При повышении генерируемой массы относительно 7 мг возможно некоторое стекание. В выполненных экспериментах условия взрывного парообразования реализовались при разном характере обволакивания включения жидкостью, а также разном расположении включения (с использованием стержня диск фиксировали основанием или боковой гранью под разными углами к основанию стенда) относительно восходящего потока высокотемпературных газов. Устойчивое взрывное парообразование для меняющихся условий можно объяснить интенсивным нагревом капель вследствие высоких температур газов и малыми временами протекания процессов.

В проведенных экспериментах при варьировании температуры внешней газовой среды и начальных толщин пленки воды установлены условия, при которых возможна реализация первого и второго вариантов испарения гетерогенной капли. Так, в частности, выявлено, что взрывное парообразование возможно только при температурах газов более 650 К (см. таблицу). При меньших температурах независимо от размера капли зарегистрировано только интенсивное испарение воды с ее свободной поверхности. При температурах выше 650 К возможность взрыва капли определяется толщиной пленки воды. Так, в частности, при средней толщине менее 0.15 мм в экспериментах

выделено испарение только со свободной поверхности. При повышении этой толщины во всем диапазоне варьирования реализовался взрывной вариант развития процесса.

Полученные результаты показывают, что условия взрывного парообразования неоднородной капли реализуются при высоких тепловых потоках к ее поверхности и за короткие интервалы времени (в течение нескольких секунд). Это обусловлено интенсивным прогревом прозрачной жидкости, аккумулярованием подведенной энергии в тонком приповерхностном слое воды у внутренних границ раздела сред вследствие непрозрачности включения. Как следствие, обеспечение условий взрывного парообразования при интенсивном нагреве зависит в первую очередь от свойств (оптических и теплофизических) жидкости и материала включения. Для усиления выделенного эффекта можно рекомендовать непрозрачные материалы с низкой теплопроводностью. Для приложений (например, [1–6]), в которых неоднородные капли перемещаются через высокотемпературные газовые среды, целесообразно выбирать включения в том числе и с малой плотностью для минимизации смещения включения в капле относительно центра масс.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ (МД-2806.2015.8).

Список литературы

- [1] *Никитин М.Н.* // Промышленная энергетика. 2010. № 12. С. 37–42.
- [2] *Вальдберг А.Ю., Макеева К.П.* // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2010. № 5. С. 42–44.
- [3] *Марьин Б.Н., Ким В.А., Сысоев О.Е.* Обработка поверхностей в металлургии и машиностроении. Владивосток: Дальнаука, 2011. 421 с.
- [4] *Strizhak P.A.* // J. Eng. Phys. Thermophys. 2013. V. 86. N 4. P. 895–904.
- [5] *Терехов В.И., Пахомов М.А.* Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapпельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
- [6] *Вараксин А.Ю.* // ТВТ. 2013. Т. 51. № 3. С. 421–455.
- [7] *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Tech. Phys. 2014. V. 59. N 12. P. 1770–1774.
- [8] *Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Fire Saf. J. 2014. V. 70. P. 61–70.
- [9] *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Int. J. Therm. Sci. 2015. V. 88. P. 193–200.
- [10] *Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // J. Eng. Phys. Thermophys. 2013. V. 86. N 6. P. 1413–1418.