

03

Испарение капли воды с твердым непрозрачным включением при движении через высокотемпературную газовую среду

© Д.В. Антонов, Р.С. Волков, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак

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

Поступило в Редакцию 17 сентября 2015 г.

Выполнено экспериментальное исследование процесса испарения неоднородной (содержащей частицу графита) капли воды при ее движении через высокотемпературную (около 1100 К) газовую среду с использованием средств высокоскоростной (не менее 10^5 fps) видеорегистрации, панорамного оптического метода PIV и программного обеспечения Tema Automotive. Установлено влияние соотношения масс воды и включения, формы (на примере цилиндрического диска, куба и параллелепипеда) и площади поверхности последнего на интегральные характеристики испарения жидкости после прохождения гетерогенными каплями канала (длина 1 м, внутренний диаметр 0.2 м) с высокотемпературными газами.

При создании современных химических и энергетических технологий на основе гетерогенных и двухфазных газо- и паракапельных потоков большое внимание уделяется изучению интенсификации процессов теплообмена, установлению соответствующих механизмов фазовых превращений капель жидкости с твердыми включениями, условиям реализации разных режимов фазовых превращений на границах раздела сред „жидкость–твердая непрозрачная частица“ [1–5]. Такой подход способствует развитию большой группы практических приложений (например, огневая очистка жидкостей [6], полидисперсное пожаротушение [7], теплоносители на базе дымовых газов, капель и паров воды [8]).

Результаты исследований [9–11] показали, что введение углеродистых частиц в капли воды интенсифицирует в несколько раз фазовые

превращения последних в высокотемпературной (более 700 К) газовой среде. Установлено [11], что испарение капли жидкости, содержащей соразмерное непрозрачное включение, в высокотемпературных газах реализуется по одной из двух схем: 1) испарение только со свободной (внешней) поверхности капли; 2) испарение со свободной поверхности и интенсивное парообразование на внутренних границах раздела сред. Фазовые превращения по второй схеме изучены довольно полно в работе [11]. Эксперименты [11] проведены с неподвижной каплей, помещенной в высокотемпературную газовую среду с применением керамического стержня. Целесообразными являются экспериментальные исследования с движущимися через высокотемпературные газы неоднородными каплями для соответствия технологиям [6–8].

Цель данной работы — экспериментальное исследование процесса испарения неоднородной (с единичным твердым непрозрачным включением) капли воды при движении через высокотемпературную газовую среду.

При проведении исследований применялся стенд, по основным характеристикам и схеме аналогичный опытам [9–11]. Выполнялась видеорегистрация исследуемых процессов двумя высокоскоростными камерами (скорость съемки до $6 \cdot 10^5$ fps). Обработка полученных данных проводилась с использованием программного обеспечения Tema Automotive [11]. Регистрировались изображения капель воды с включениями (частицы графита) различной формы в процессе их движения через цилиндрический канал (высота 1 м, внутренний диаметр 0.2 м), заполненный продуктами сгорания ацетона. Температура последних (T_g) составляла около 1100 К (аналогично [9–11]). Использованы частицы в форме цилиндрического диска (диаметр 1.65 mm, высота 3.1 mm), куба (длина, ширина, высота 1.9 mm) и параллелепипеда (длина 1.3 mm, ширина 1.5 mm, высота 3.5 mm).

Каждая серия экспериментов включала следующие этапы:

— горелка, расположенная в нижней части цилиндрического канала для регистрации капель, заполнялась ацетоном (объем 200 ml), инициировалось зажигание последнего;

— во внутреннюю полость установленного над горелкой цилиндра поступали продукты сгорания, по истечении 200 s (временная задержка необходима для установления температуры газов в канале около 1100 К) капли воды с включениями сбрасывались в зону пламени с высоты 1.3 m относительно основания горелки;

— температура продуктов сгорания T_g контролировалась тремя вольфрам-рениевыми термопарами (диапазон измеряемых температур 0–2473 К, максимальная допустимая погрешность $\pm 0.005|T_g|$), закрепленными на высоте 0,25, 0,5 и 0,75 м соответственно относительно основания горелки;

— изображения гетерогенных капель регистрировались видеокамерами на входе и выходе из цилиндра с высокотемпературными газами, затем проводилась обработка данных.

При идентичных условиях (начальных диаметрах капель d_0 , температурах жидкости T_w , скоростях движения капель u_0 , температурах газов (продуктов сгорания) T_g и скоростях их движения u_g) проводилось не менее 10 экспериментов.

Для контроля скоростей движения потока высокотемпературных газов u_g применялся кросскорреляционный комплекс (включает лазер, камеру и синхронизатор) [9] и панорамный метод PIV, в основе которого использовался подход регистрации мгновенных распределений скоростей трассеров в потоке газов между вспышками лазера. Трассирующие частицы (нанопорошок диоксида титана) вводились в поток газов в нижней части цилиндра с высокотемпературными газами (аналогично [9]). Скорости движения продуктов сгорания во всех экспериментах составляли около 1,5 м/с. Контроль скоростей движения газов важен в проведенных экспериментах для обеспечения идентичных условий перемещения неоднородных капель.

Для определения размеров (радиусов) капель применялось программное обеспечение Tema Automotive [11]. Вычисление масштабного коэффициента проводилось с помощью координатной линейки. После измерения размеров капель рассчитывался параметр ΔR ($\Delta R = (R_0 - R)/R_0$, где R_0 , R — радиусы капли до и после прохождения высокотемпературных продуктов сгорания соответственно), характеризующий уменьшение размеров капель в процессе испарения. Для определения параметра Δm , характеризующего уменьшение массы капли воды, с применением аналитических весов Vibra AF 225DRCE (максимальный вес 220 г, минимальный вес 0,001 г, погрешность не более 0,5% от измеряемой массы) измерялись массы гетерогенных капель жидкости до и после прохождения высокотемпературной газовой среды. Масса включений измерялась перед введением в каплю.

Генерация капель воды заданного объема осуществлялась дозатором (диапазон дозирования 10–100 μl , максимальная погрешность $\pm 3\%$).

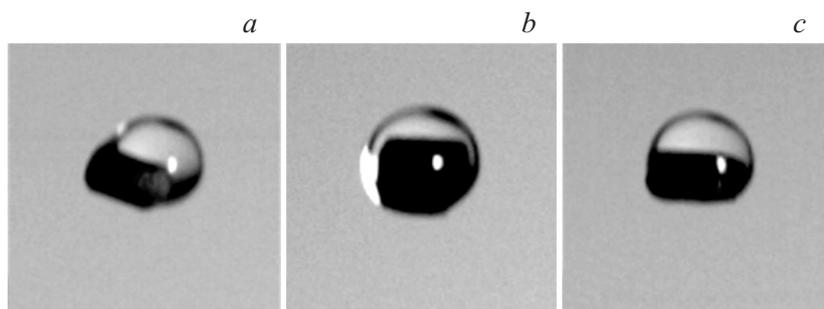


Рис. 1. Типичные кадры с изображениями каплей воды, содержащих включения разных форм (*a* — цилиндр, *b* — куб, *c* — параллелепипед) в процессе их движения через высокотемпературные газы.

Процесс введения гетерогенной капли в цилиндр с газами выполнялся с помощью подложки с гидрофобной поверхностью. В качестве гидрофобного покрытия использовался парафин (октадекан $C_{18}H_{38}$). Формирование и сброс гетерогенных капель выполнялись в несколько этапов:

- на гидрофобную поверхность, находящуюся в горизонтальном положении, опускалась генерируемая электронным дозатором капля воды;

- в каплю жидкости вводилось единичное твердое включение;

- с применением моторизованного координатного устройства подложка с гетерогенной каплей поднималась к расчетной точке (1.3 м относительно основания цилиндра), затем осуществлялся сброс капли в высокотемпературную среду (вертикальный цилиндрический канал с горелкой в основании).

Систематические погрешности средств измерения размеров капель воды и включений не превышали 0.06 мм. Случайные погрешности определения d_0 составили не более 7–10% относительно среднего для серии (при идентичных начальных условиях).

На рис. 1 приведены типичные кадры движущихся в высокотемпературных газах каплей, содержащих частицы в форме цилиндра, куба и параллелепипеда. Установлено, что положение частицы в капле в процессе движения изменяется. Этот результат соответствует

положениям теории [5]. Часто регистрировался случай, при котором включение располагалось в нижней части капли (рис. 1). Это обусловлено большей плотностью включения по сравнению с жидкостью. Достаточно регулярно происходило частичное выступление включения с поверхности капли (чаще в ее нижней части). При этом включение за счет большей теплопроводности, чем у воды, прогревалось быстрее. Непрозрачность включения усиливала данный эффект (за счет аккумуляции лучистого теплового потока на границе раздела сред „включение–жидкость“). Как следствие, в случаях частичного выступления включения характеристики испарения были максимальными. В то же время видеogramмы показали, что за период движения капле через высокотемпературный канал на внутренних границах раздела сред не зарождались пузырьки пара. Эти данные позволяли сделать вывод об интенсивном парообразовании только с внешней поверхности капли.

Влияние твердого включения на интенсификацию процесса испарения неоднородной капли можно проанализировать с использованием рис. 2 и 3. Приведенные на рис. 2, *a* зависимости достаточно наглядно иллюстрируют влияние массовой доли воды в составе гетерогенной капли на условия и характеристики испарения. При соотношении $m_{in}/m_w \approx 1$ (m_{in} — масса включения, g ; m_w — масса воды, g) масса испарившейся воды значительно выше, чем при $m_{in}/m_w \approx 0.7$ (начальная масса воды больше, чем масса включения). Выделенная закономерность характерна для всех рассмотренных форм включений. Аналогичная тенденция наблюдается и на рис. 2, *b* (уменьшение начального радиуса гетерогенной капли).

Рис. 3 показывает, что масса испарившейся жидкости зависит от площади поверхности включения. При этом монотонность кривых $\Delta m_w = f(S_{in})$ сохраняется при изменении начальных масс жидкости. Цилиндрическая форма включения обеспечивала наибольшую интенсификацию испарения неоднородной капли при прочих равных условиях за счет меньшей площади поверхности, а следовательно, меньшего времени прогрева частицы. Быстрый прогрев включения приводил к интенсификации испарения с внешней поверхности неоднородной капли. Парообразование на внутренних границах раздела сред „включение–вода“ [11] не наблюдалось из-за малой длительности процесса. Это обусловлено ограниченной длиной (1 м) цилиндра с высокотемпературными газами.

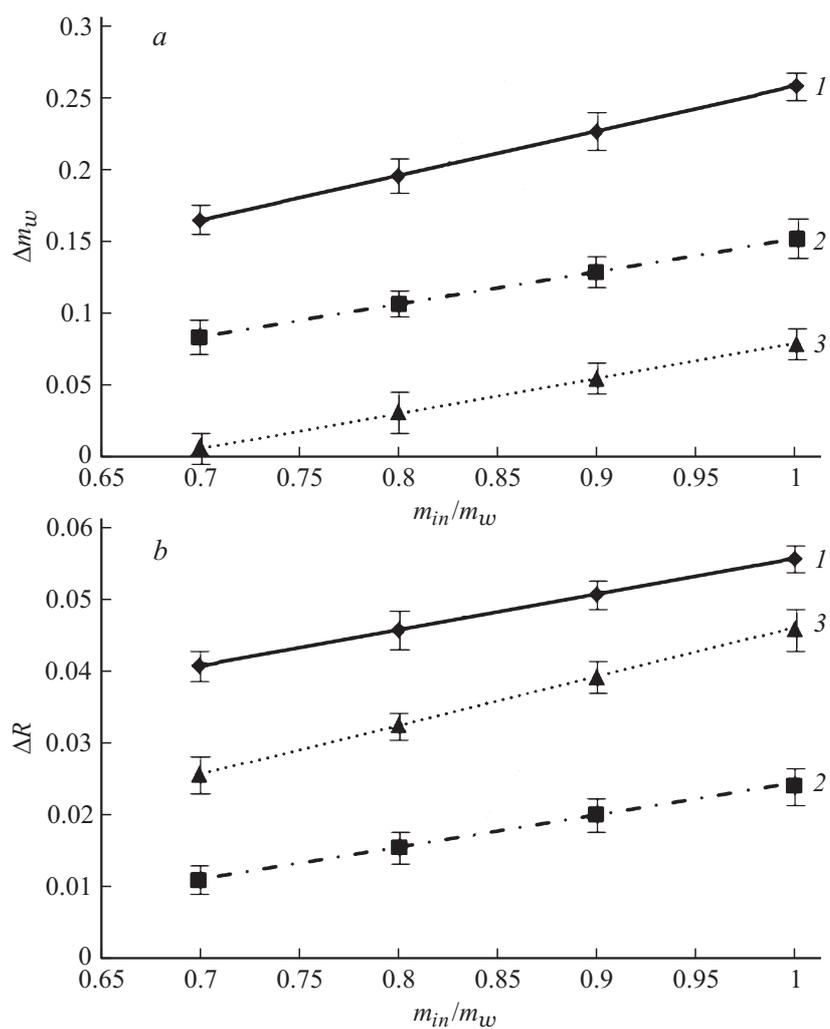


Рис. 2. Зависимости параметров Δm_w (a) и ΔR (b) от соотношения массовых долей компонентов гетерогенных капель, содержащих включения разных форм: 1 — цилиндр, 2 — куб, 3 — параллелепипед.

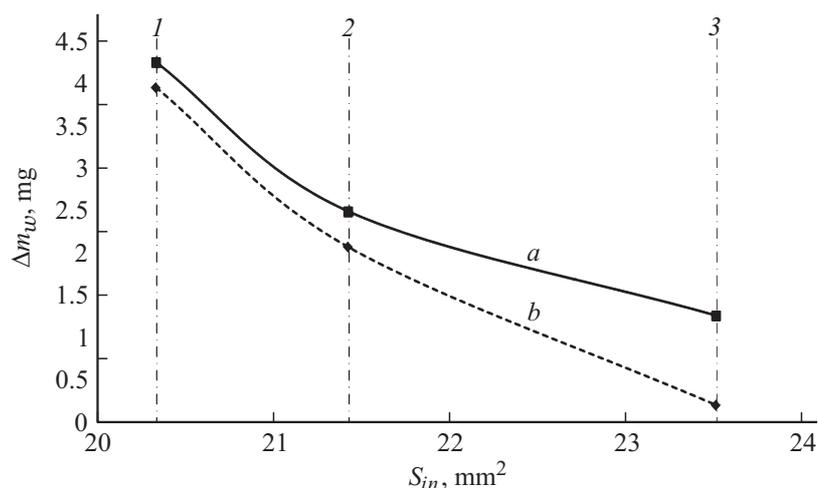


Рис. 3. Зависимость параметра Δm_w от площади поверхности включения S_{in} (1 — цилиндр, 2 — куб, 3 — параллелепипед) при варьировании начальной массы воды (a — 17 мг, b — 25 мг).

На рис. 2, *a* видно, что для капель с включениями в форме параллелепипеда при $m_{in}/m_w \approx 0.7$ убыли массы жидкости практически нет, а при $m_{in}/m_w \approx 1$ она в несколько раз меньше, чем для цилиндрического включения. Можно заключить, что включение в форме параллелепипеда, обладающее наибольшей площадью поверхности среди рассмотренных форм, за время прохождения через высокотемпературную газовую среду недостаточно прогревается (аккумулированной энергии не хватает для интенсификации испарения).

В качестве основных варьируемых параметров для определения условий интенсивных фазовых превращений гетерогенных капель можно использовать характеристики включения (площадь и форма) и взаимного расположения элементов неоднородной структуры (частичное выступление включения с поверхности капли). Варьируя эти параметры, а также параметры газовой среды (выполнено в [11]), можно обеспечить интенсивное испарение неоднородных капель жидкости в условиях, соответствующих на практике высокотемпературным газопарокапельным технологиям.

Эксперименты показали, что варьирование площади поверхности включения значительно влияет на характеристики испарения неоднородных капель жидкости. Однако целесообразно учитывать время нахождения неоднородной капли в высокотемпературной газовой среде. Длительный (более 2 s) прогрев включения интенсифицирует процессы парообразования на внутренних границах раздела сред и может приводить к разрушению капли [11]. В ходе комплексного анализа также следует учитывать и другие определяющие параметры, в частности температуру газовой среды, скорость движения потока, массу жидкости и т. д. Скорее всего, это является первоочередной задачей для развития теории испарения неоднородных капель жидкостей, суспензий и эмульсий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента Российской Федерации (МД-2806.2015.8).

Список литературы

- [1] *Doh D.H., Yum J.H., Cho G.R., Kim M.H., Ryu G.W., Takei M.* // J. Therm. Sci. 2013. V. 22. N 5. P. 478–483.
- [2] *Gherasim I., Roy G., Nguyen C.T., Vo-Ngoc D.* // Int. J. Therm. Sci. 2011. V. 50. N 3. P. 369–377.
- [3] *Вараксин А.Ю.* // ТВТ. 2013. Т. 51. № 3. С. 421–455.
- [4] *Вараксин А.Ю.* // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 777–796.
- [5] *Терехов В.И., Пахомов М.А.* Тепломассоперенос и гидродинамика в газокпельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.
- [6] *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 11–18.
- [7] *Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 3. С. 50–58.
- [8] *Никитин М.Н.* // Промышленная энергетика. 2010. № 12. С. 37–42.
- [9] *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Int. J. Therm. Sci. 2015. V. 88. P. 193–200.
- [10] *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // Tech. Phys. 2014. V. 59. N 12. P. 1770–1774.
- [11] *Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 16. С. 98–104.