

03

## Отличие условий и характеристик испарения неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде

© М.В. Пискунов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: piskunovmv@tpu.ru

(Поступило в редакцию 5 октября 2015 г. В окончательной редакции 2 февраля 2016 г.)

Выполнено экспериментальное исследование процессов испарения капель воды с начальной массой 5–15 мг на неподвижной графитовой подложке, а также неоднородных, с твердыми единичными включениями, капель при нагреве высокотемпературными продуктами сгорания. Проведены эксперименты с аналогичными неоднородными каплями при их движении через продукты сгорания. Установлена возможность реализации двух механизмов фазовых превращений неоднородных капель жидкости. Выделены масштабы влияния площади поверхности включения (до 20%) и начальной массы воды (до 90%) на характеристики испарения неоднородных капель.

### Введение

Одной из основных целей введения (добавления) специализированных твердых включений (частиц) в жидкости, эмульсии и суспензии (с соответствующим распылением последних) является, как правило, интенсификация [1–5] фазовых превращений на внутренних и внешних границах раздела сред „жидкость–газ“ и „жидкость–твердое тело“. Результаты теоретических [1,2] и экспериментальных [3–5] исследований иллюстрируют большие перспективы (повышение эффективности использования водяных ресурсов [6]) применения данного подхода в таких отраслях, как теплоэнергетика, химическое и нефтехимическое производства, пожаровзрывобезопасность и др.

Следует отметить, что механизм фазовых превращений на границе „твердая частица–вода“ внутри неоднородной капли остается слабо изученным. Целесообразно уделить особое внимание определению доминирующего механизма фазовых превращений при взаимодействии капель воды с твердыми включениями в высокотемпературной (около 1100 К) газовой среде, а также выделить условия реализации разных режимов парообразования. Решение такой задачи позволит использовать рассматриваемый подход интенсификации фазовых превращений в широкой группе приложений (например, термическая или огневая очистка технологических и сточных вод [7], полидисперсное пожаротушение [8], создание теплоносителей на базе дымовых газов, капель и паров воды [9], размораживание сыпучих сред [10], обработка зашлакованных теплонагруженных поверхностей энергетического оборудования [11]).

В результате теоретических и экспериментальных исследований [12] установлено, что возможна реализация нескольких схем парообразования капли жидкости, содержащей соразмерное непрозрачное включение: испарение жидкости со свободной (внешней) поверхности капли и кипение на внутренней границе раздела сред (приводящее к „взрывному“ разрушению капли). Также

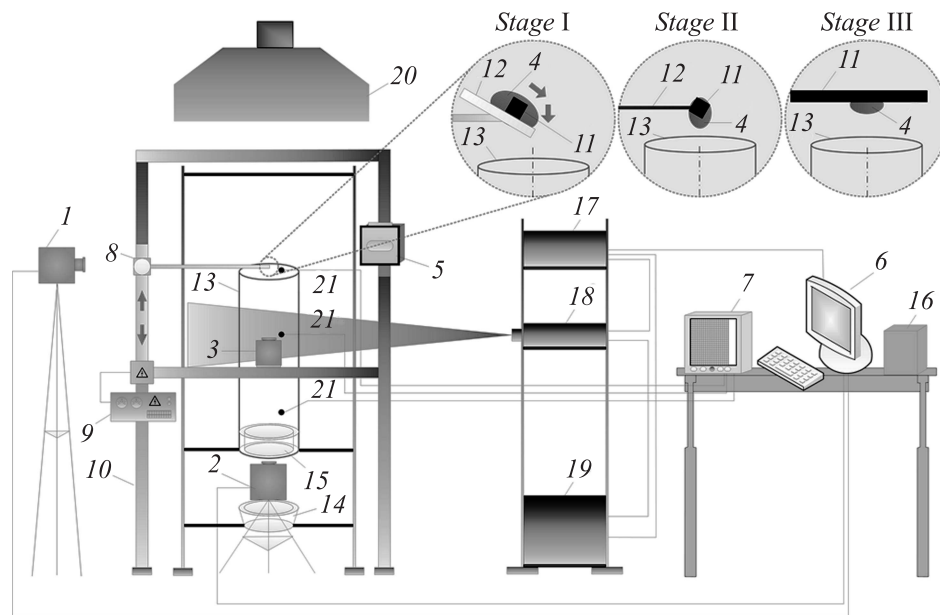
можно выделить результаты исследований испарения капель жидкостей на подложках из разных материалов (например, [13–16]). Эти эксперименты аналогичны (по используемым методикам) опытам [12]. Их результаты хорошо соответствуют экспериментальным данным [3–5,17]. Анализ данных [12–17] позволяет заключить, что среди параметров реализации фазовых превращений существуют наиболее значимые, определяющие, главным образом, характер протекания процесса (например, температура газовой среды, размеры и формы включений). Целесообразным является экспериментальное исследование отличий условий и характеристик парообразования движущихся через высокотемпературные газы капель (с единичными соразмерными включениями), неподвижных неоднородных капель и испаряющихся на подложке (при размерах последней, много больших по сравнению с включениями).

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование отличий условий и характеристик процессов испарения и кипения неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде.

### 1. Экспериментальный стенд и методы исследований

Эксперименты выполнены на стенде (рис. 1), который по основным элементам и характеристикам аналогичен применяемому при проведении исследований [12]. Для обработки экспериментальных данных использованы оптический метод Particle Image Velocimetry (PIV) [18–20] и программное обеспечение Tema Automotive [12,21–23].

Изготавливались графитовые частицы (включения) 11 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). Осуществлялось их взвешивание с применением измерительной системы 16 Vibra AF 225DRCE (максимальная и минимальная масса — 220 g и 0.001 g,



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: 1, 2 — высокоскоростные видеокамеры, 3 — кросскорреляционная камера, 4 — капля воды, 5 — осветительный прожектор, 6 — персональный компьютер (ПК), 7 — регистратор многоканальный технологический (PMT), 8 — моторизованное координатное устройство (МКУ), 9 — блок питания МКУ, 10 — алюминиевая стойка, 11 — твердое включение/графитовая подложка, 12 — подложка с гидрофобной поверхностью/керамический стержень, 13 — цилиндр из кварцевого стекла, 14 — уловитель капель, 15 — полый цилиндр с горючей жидкостью, 16 — аналитические весы, 17 — синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера, 18 — двойной импульсный Nd:YAG-лазер, 19 — генератор лазерного излучения, 20 — нагнетательная система, 21 — термопары.

погрешность не более 0.5% от измеряемой массы). Выбор размеров включений с разной конфигурацией обусловлен необходимостью обеспечения близких площадей (они выступали в качестве варьируемых параметров в экспериментах) поверхности получаемых неоднородных капель и границ раздела „жидкость–газ“ и „жидкость–твердое тело“.

Для генерации высокотемпературной газовой среды применялся технический спирт. Состав его продуктов сгорания включал:  $\text{CO}_2$  — 4.433%,  $\text{CO}$  — 0.058%,  $\text{O}_2$  — 14.907%,  $\text{NO}$  — 0.002%,  $\text{NO}_x$  — 0.002%, другие углеводородные компоненты и  $\text{N}_2$  — 80.598%. Измерение содержания компонентов продуктов сгорания выполнено с помощью газоанализатора Testo 300XXL (погрешность  $\pm 0.2\%$ , дискретность измерения 0.01%). Технический спирт (в объеме 200 ml) заливался в горелку 15 (специализированный полый цилиндр), которая устанавливалась в основание цилиндрического канала 13 (аналогично экспериментам [12]). Затем инициировалось зажигание спирта. Во внутреннюю полость цилиндра 13 поступали продукты сгорания. Для установления температуры газов в канале около 1100 К требовалось 180–210 с. По истечении этой временной задержки начались эксперименты с неоднородными каплями. Контроль температуры продуктов сгорания  $T_g$  выполнялся тремя вольфрам-рениевыми термопарами 21 (диапазон измеряемых температур 0–2473 К, максимальная допустимая погрешность  $\pm 0.005 \cdot |T_g|$ ), закрепленными на высоте 0.25, 0.5 и 0.75 м (относительно горелки 15).

Показания термопар 21 передавались на регистратор 7 с возможностью последующей обработки данных на персональном компьютере (ПК) 6.

По поперечному сечению канала 13 температура продуктов сгорания изменялась в пределах 15–20 К. По продольному (от основания горелки до верхнего края цилиндра 13) сечению зарегистрированы изменения температуры на 18–30 К относительно 1100 К. Как следствие, при анализе результатов экспериментов считалось, что температура продуктов сгорания в канале 13 в среднем составляла 1100 К.

Метод PIV применялся для контроля скоростей движения потока высокотемпературных газов  $u_g$ . В основе метода лежит регистрация мгновенных распределений скоростей трассеров в потоке газов между вспышками лазера 18. Ввод трассирующих частиц (нанопорошок — диоксид титана  $\text{TiO}_2$ ) в поток газов осуществлялся в нижней части цилиндра 13 (аналогично [4–5, 12]). После проведения контрольных измерений  $u_g$  подача трассеров прекращалась и выполнялись основные опыты с каплями воды. Скорости движения газов во всех экспериментах составляли около 1.5 м/с (регулировались нагнетательной системой 20).

Экспериментальная методика исследований включала несколько этапов. На первом этапе (рис. 1) регистрировались изображения капель воды 4 с графитовыми включениями 11 в процессе их движения через кварцевый цилиндр 13 (высота — 1 м, внутренний диаметр — 0.2 м), заполненный высокотемпературными продуктами

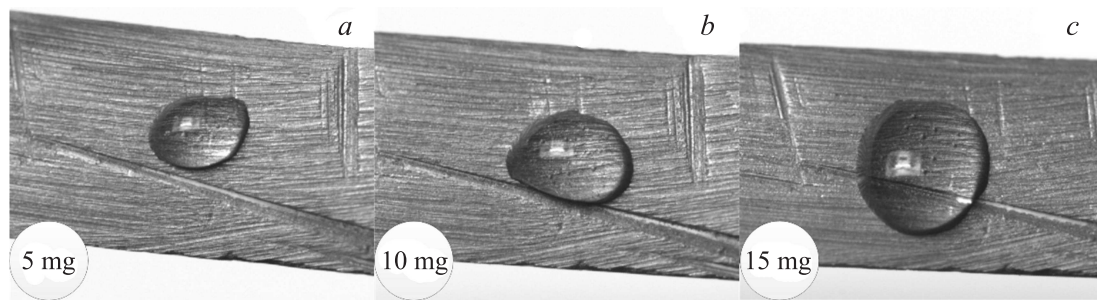


Рис. 2. Внешний вид капель воды (с разной начальной массой) на графитовой подложке: *a* — 5 mg, *b* — 10 mg, *c* — 15 mg.

сгорания. Формирование и сброс неоднородной капли воды в цилиндр 13 выполнялся с помощью подложки с гидрофобной поверхностью 12 (в качестве покрытия использовался парафин — октадекан  $C_{18}H_{38}$ ). Дозатором (диапазон дозирования 10–100  $\mu\text{l}$ , максимальная погрешность  $\pm 3\%$ ) генерировалась капля воды 4 и опускалась на подложку 12. В каплю 4 вводилось единичное включение 11. Далее с применением моторизованного координатного устройства 8 подложка 12 поднималась на высоту 1.3 м относительно основания цилиндра 13, и осуществлялся сброс неоднородной капли воды в высокотемпературные газы.

Программное обеспечение Tema Automotive применялось для измерения радиусов неоднородных капель [1]. После определения радиусов капля рассчитывался параметр  $\Delta R$  ( $\Delta R = R_0 - R$ ), где  $R_0, R$  — радиусы капли до и после прохождения высокотемпературных продуктов сгорания соответственно). После измерения масс неоднородных капель жидкости (с помощью измерительной системы 16) до ( $m_{w0}$ ) и после  $m_w$  прохождения высокотемпературных газов рассчитывался параметр  $\Delta m_w$  ( $\Delta m_w = m_{w0} - m_w$ ), характеризующий уменьшение массы капли воды 4. Масса включения 11 измерялась предварительно перед его введением в каплю воды.

На втором этапе исследований изучались условия парообразования, при которых неоднородная капля закреплялась (аналогично методике [12]) на керамическом стержне 12 (длина — 0.25 м). На оси симметрии включения 11 выполнялось технологическое отверстие радиусом 0.5 мм и глубиной не более 0.3 мм, позволяющее закрепить частицу 11 на стержне 12. Такой подход позволил контролировать время нагрева капли, а применение керамического стержня 12 минимизировало его влияние на протекающие тепловые процессы. Координатное устройство 8 перемещало стержень 12 с закрепленной на нем неоднородной каплей в канал 13 через третье технологическое отверстие (0.75 м относительно горелки). Видеорегистрация в каждом эксперименте продолжалась до полного испарения воды, и определялись времена существования капель  $\tau_h$ .

Третий этап (рис. 1) по основным характеристикам аналогичен второму (за исключением изменений в системе „стержень–неоднородная капля“). В частности, стержень 12 заменен на графитовую подложку 11 (дли-

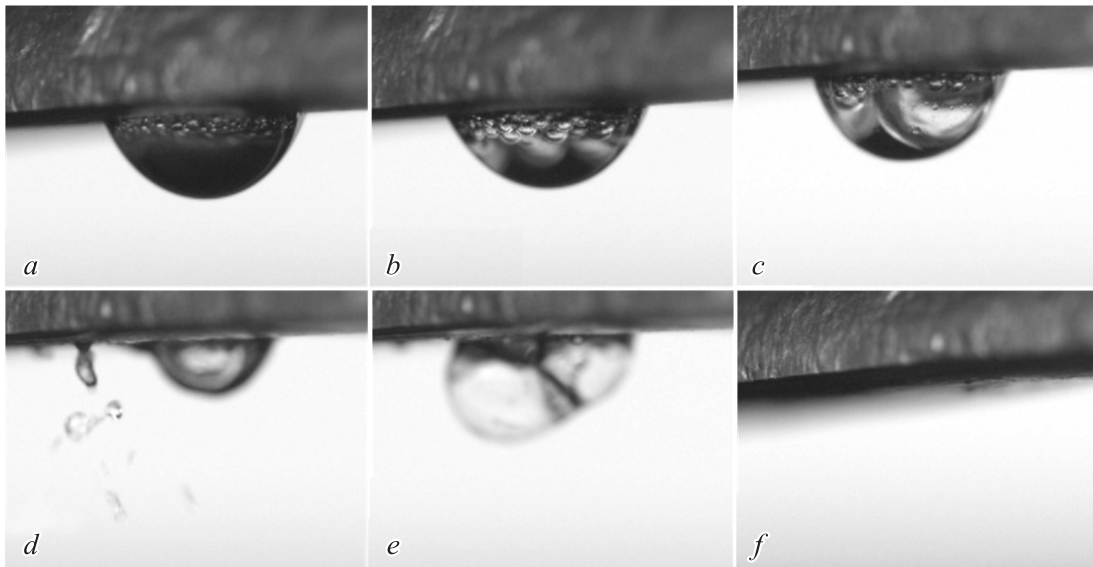
на — 0.1 м, толщина — 0.005 м, ширина — 0.01 м). Капля генерировалась дозатором и помещалась на поверхность подложки (рис. 2), которая затем перемещалась в цилиндр 13.

На каждом этапе проводились не менее 10 экспериментов при идентичных условиях (начальных размерах и массе каплей, температурах продуктов сгорания и скоростях их движения). Максимальная погрешность вычисления времен полного испарения капель не превышала 0.005 с. Максимальные систематические погрешности средств измерения размеров капель воды и включений составили 0.05 мм. Случайные погрешности определения этих параметров не превышали 8–10% относительно среднего для серии.

## 2. Результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты позволили установить доминирующие механизмы и временные характеристики фазовых превращений для каждого из выделенных положений границ раздела сред „жидкость–газ“ и „жидкость–твердое тело“.

На рис. 3 приведены типичные стадии реализации процесса интенсивного парообразования капли воды массой 15 mg на подложке. Выделены времена нагрева, характерные для каждой стадии. Следует отметить, что для данного варианта свойственно интенсивное образование парового слоя вблизи границы раздела сред „жидкость–твердое тело“. Как видно из рис. 3, *a* и *c*, капля воды за время нагрева  $\tau_h \approx 12.5$  с практически не уменьшилась в размерах, а паровой слой за это время заполнил почти всю ее внутреннюю полость. Из особенностей образования парового слоя (рис. 3, *a, b* и *c*) можно выделить мгновенное (менее 1 с с момента начала нагрева) формирование пузырьков пара (а также их слияние, укрупнение и отрыв) вблизи внутренней границы раздела сред „твердое тело–жидкость“. Доминирующим механизмом фазовых превращений в данном случае являлось интенсивное парообразование на границе „подложка–жидкость“. Испарение с внешней поверхности капли практически не наблюдалось. Рис. 3, *d* иллюстрирует некоторое перемещение (относительно начального положения) капли воды вследствие роста



**Рис. 3.** Кадры с изображением капли (массой 15 мг) в процессе испарения и кипения на подложке: *a* —  $\tau = 0$  s, *b* —  $\tau = 8.20$  s, *c* —  $\tau = 12.50$  s, *d* —  $\tau = 20.20$  s, *e* —  $\tau = 20.54$  s, *f* —  $\tau = 25.65$  s.

размеров парового слоя и отделения фрагментов жидкости (групп мелкий каплей) после разрушения пленки, вызванного критическим увеличением пузырьков пара. Последнее является следствием достижения условия, при котором давление паров внутри капли превышает давление, обусловленное силами поверхностного натяжения жидкости и внешней среды. Перемещение капли жидкости, в свою очередь, можно объяснить эффектом Лейденфроста [24–26]. Сформированный паровой слой с более низкой теплопроводностью [27] по сравнению с водой является своего рода теплоизолирующей прослойкой („буферной“ зоной), уменьшающей площадь контакта жидкости с подложкой и обеспечивающей „скольжение“ капли. На данной стадии (рис. 3, *d* и *e*) особенностью является часто повторяющееся разрушение целостности пузырьков пара, сопровождающееся отделением фрагментов жидкости (рис. 3, *f*).

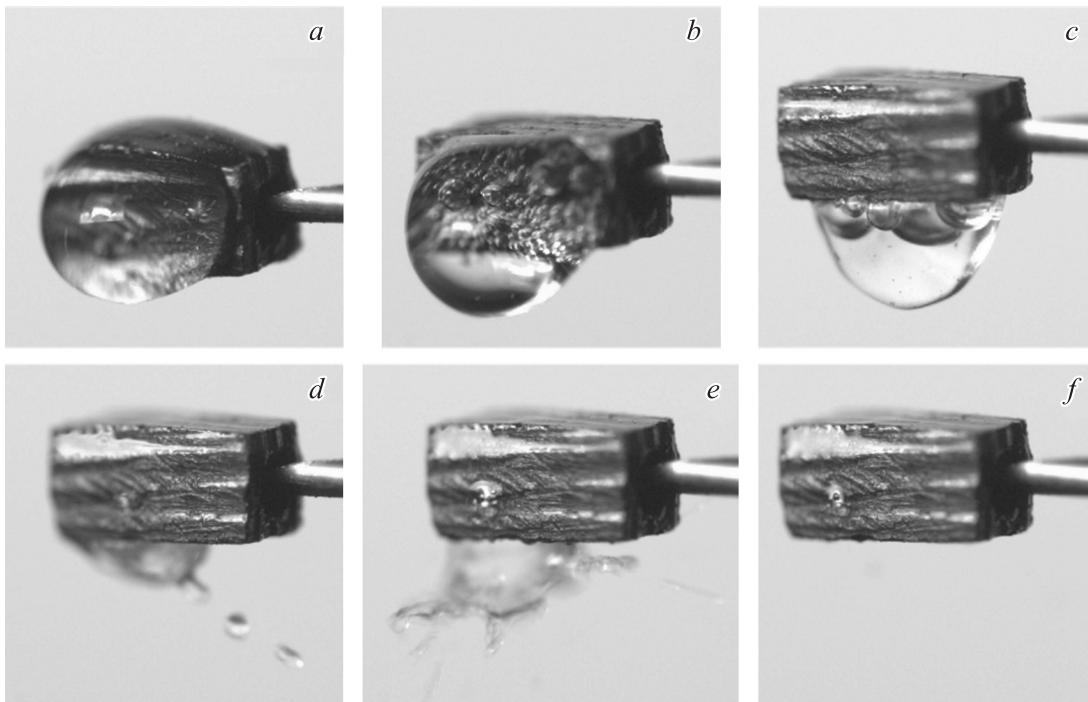
Типичные стадии реализации нескольких механизмов фазовых превращений (кипение и испарение) представлены на рис. 4. В данном случае эксперимент выполнен в соответствии с методикой второго этапа. На рис. 4, *a*, *b* и *c* признаки интенсивного парообразования на границе раздела сред „включение–вода“ не наблюдаются, как в случае с подложкой (рис. 3, *a*, *b* и *c*) при соответствующих временах. На рис. 4, *a* видно, что включение полностью покрыто жидкостью. Можно утверждать, что первоначально прогревается слой жидкости и только затем твердое включение (в отличие от случая с подложкой, где обеспечивается контакт последней с газами). Прогрев слоя жидкости, очевидно (рис. 4, *a*, *b* и *c*), сопровождается испарением с внешней поверхности капли. При  $\tau_h \approx 7.5$  s (рис. 4, *c*) характерный размер капли стал значительно меньше относительно начального. Количество энергии, аккумулируемой включением на границе раздела сред, существенно увеличивается,

когда характерная толщина пленки воды вокруг включения уменьшается (несколько граней включения в этот момент покрыты лишь тонкой пленкой жидкости). При этом значительно интенсифицируется парообразование внутри капли. Далее процесс развивается аналогично нагреву капли на подложке (рис. 3, *d*, *e* и *f*) — происходит кипение жидкости, сопровождающееся разрушением пленки воды.

Следует особо отметить, что в случае испарения капли воды с подложки определяющую роль в достижении условий интенсивного парообразования на границе раздела сред играет не столько высокая температура газовой среды, сколько массивность графитовой подложки по сравнению с размерами капли. При одновременном прогреве подложки и жидкости (в отличие от случая на рис. 4, *a*) обеспечивается существенный приток аккумулируемой подложкой энергии к внутренней границе раздела сред „твердое тело–жидкость“ вследствие большей теплопроводности графита по сравнению с водой [28].

На рис. 5 представлены результаты сопоставления времен ( $\tau_h$ ) существования (полного испарения) капель воды на подложке (1) и неоднородных капель с твердыми включениями различных размеров (2 — 4 мм, 3 — 3 мм, 4 — 2 мм) при идентичных условиях нагрева. Для неоднородных капель воды (2–4) можно сделать вывод о том, что при увеличении площади поверхности включения время  $\tau_h$  значительно снижается. Чем больше площадь поверхности включения, тем больше энергии аккумулируется у последней после прохождения через слой жидкости (за счет радиационного, конвективного и кондуктивного тепловых потоков). Вследствие непрозрачности включения поток излучения после прохождения через воду аккумулируется у его поверхности (в малом приповерхностном слое). Увеличение площади контакта включения со слоем жидкости интенсифици-





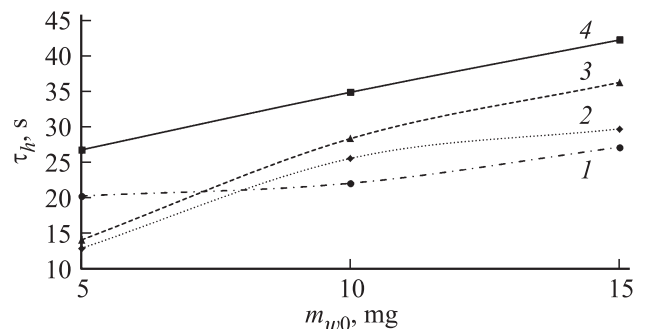
**Рис. 4.** Кадры с изображением закрепленной на керамическом стержне неоднородной капли (массой 5 мг) в процессе испарения и кипения: *a* —  $\tau = 0$  s, *b* —  $\tau = 1.25$  s, *c* —  $\tau = 7.47$  s, *d* —  $\tau = 12.56$  s, *e* —  $\tau = 13.52$  s, *f* —  $\tau = 13.83$  s.

рует отток аккумулированной им тепловой энергии в выделенный выше приповерхностный слой. Наблюдается интенсивное парообразование на границах раздела сред „жидкость–включение“. Возрастают скорости парообразования на внутренних и внешних границах раздела сред. Отметим, что при увеличении массы воды неоднородной капли от 5 до 15 мг время полного испарения возрастает почти вдвое (рис. 5). В случае испаряющейся на подложке капли воды установлено более умеренное изменение  $\tau_h$ . Время существования капли при увеличении массы жидкости от 5 до 15 мг изменяется лишь на  $\Delta\tau_h \approx 5$  s (рис. 5). Такие большие времена полного испарения капель (близкие к значениям для неоднородных капель), а также их незначительное изменение с ростом массы воды обусловлены формированием теплоизолирующего парового слоя [24–26] между подложкой и каплей (рис. 3, *b* и *c*), который и „замедляет“ процесс испарения.

Представленные на рис. 6, *a* и *b* результаты экспериментов, проведенных в соответствии с методикой первого этапа, иллюстрируют влияние роста площади поверхности включения на интенсивность испарения неоднородной капли. Следует отметить, что в данном случае основным механизмом фазовых превращений являлось испарение с внешней поверхности неоднородной капли воды (на выходе из высокотемпературной среды в капле формирование парового слоя на границе раздела среда „включение–вода“ не зарегистрировано). В отличие от экспериментов на рис. 3 и 4, при кратковременном нагреве (0.3–0.5 s в режиме свободного падения в канале высотой 1 m) неоднородной капли включения, обладающее меньшей площадью поверхности, прогре-

валось быстрее, и соответственно убыль массы жидкости  $\Delta m_w$  увеличивалась (рис. 6, *a*). Убыль массы воды неоднородной капли приводила к уменьшению размеров капли (рис. 6, *b*). При увеличении начальной массы воды  $m_{w0}$  регистрировалось снижение параметров  $\Delta m_w$  и  $\Delta R$  (рис. 6, *a* и *b*). Такой результат можно объяснить ростом времени прогрева слоя жидкости, а следовательно, и включения. Таким образом, влияние твердого включения на интенсификацию процесса испарения при кратковременном прогреве можно считать достаточно умеренным.

В проведенных экспериментах на поверхности капли определяющую роль играли конвективный и лучистый теплообмен с газами. Соответствующие тепловые потоки можно определить (в первом приближении) с ис-



**Рис. 5.** Времена существования (полного испарения) капель воды на подложке (1) и при полном обволакивании включения с различным характерным размером (2 — 4, 3 — 3, 4 — 2 mm).

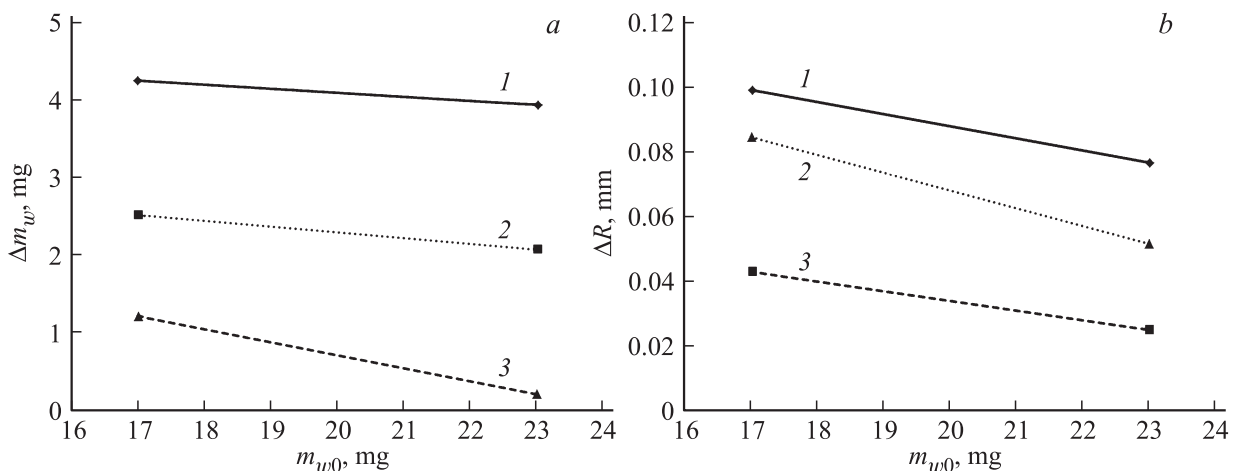


Рис. 6. Зависимости параметров  $\Delta m_w$  (a) и  $\Delta R$  (b) от начальной массы воды  $m_{w0}$  при разных формах включения: 1 — цилиндр, 2 — куб, 3 — параллелепипед.

пользованием выражений вида [29–31]:  $q_c = \alpha(T_g - T_c)$  и  $q_l = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_c^4)$ . В соответствии с [32–34], условия теплообмена на поверхности капли описываются с использованием соотношения Ранца–Маршалла  $Nu = 2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$ . Для условий проведенных экспериментов с продуктами сгорания при таком подходе значения коэффициента теплообмена  $\alpha$  не будут превышать  $5\text{--}7\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Коэффициенте  $\varepsilon$  для условий нагрева газами испаряющейся жидкости определяется с учетом излучающих свойств газов (продуктов сгорания) и паров. Спектр излучения газов, входящих в состав продуктов сгорания спирта, как и других горючих жидкостей (прежде всего водяной пар и углекислый газ), характеризуется так называемыми полосами излучения (поглощения), связанными с изменениями состояния молекул и атомов. Основными полосами спектров излучения углекислого газа и водяного пара являются [35,36]:  $\lambda_{1\text{CO}_2} \approx 2.65\text{--}2.8\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda_{2\text{CO}_2} \approx 4.15\text{--}4.45\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda_{3\text{CO}_2} \approx 13\text{--}17\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda_{1\text{H}_2\text{O}} \approx 2.3\text{--}3.4\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda_{2\text{H}_2\text{O}} \approx 4.4\text{--}8.5\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda_{3\text{H}_2\text{O}} \approx 12\text{--}30\ \mu\text{m}$ . Наличие полос спектров излучения основных (излучающих) компонентов продуктов сгорания следует учитывать при вычислении приведенной степени черноты высокотемпературной газовой среды. Ее расчет можно провести в соответствии со средним значением объемных долей соответствующих компонентов в продуктах сгорания спирта (значения объемных долей  $\text{CO}_2$  получены с использованием газоанализатора, объемная доля паров воды в продуктах сгорания принималась осредненной в соответствии со справочными данными [35,36]), оптической толщины газов и их температурой. Важно отметить, что пары воды являются одним из основных „генераторов“ излучения в системе „продукты сгорания–пары воды–капля“. В соответствии с экспериментальными данными [37,38], в малом приповерхностном слое капли их концентрация может быть очень высокой.

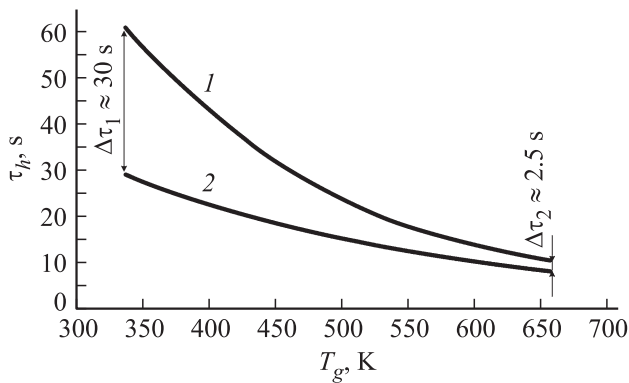
Поэтому радиационная составляющая будет только расти. С использованием справочных данных [35,36] для установленных концентраций компонентов продуктов сгорания ( $\text{CO}_2$  — 4.433%,  $\text{CO}$  — 0.058%,  $\text{O}_2$  — 14.907%,  $\text{NO}$  — 0.002%,  $\text{NO}_x$  — 0.002%, другие углеводородные компоненты и  $\text{N}_2$  — 80.598%) и температуры 1100 К установлено среднее значение коэффициента  $\varepsilon$ , равное 0.254.

Максимальная температура поверхности капли воды ( $T_e$ ) в соответствии с современными представлениями о фазовых превращениях жидкости может составлять 370 К (температура кипения воды). Численное моделирование [4,39,40] показало, что такие температуры достигаются на поверхности неоднородных капель через несколько секунд с начала нагрева при температуре газов 1100 К.

При таких исходных данных установлены значения конвективного ( $q_c$ ) и лучистого ( $q_l$ ) тепловых потоков на поверхности капли:  $q_c = \alpha(T_g - T_e) = 5(1100 - 370) \approx 3650\text{ W}/\text{m}^2$ ,  $q_l = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_e^4) = 0.254 \cdot 5.669 \cdot 10^{-8}(1100^4 - 370^4) \approx 20812\text{ W}/\text{m}^2$ .

Анализ  $q_c$  и  $q_l$  показывает, что в экспериментах с движущимися каплями (первый этап в настоящей работе) конвективные и лучистые тепловые потоки могут быть сопоставимы лишь при высоких (более 5–7 м/с) скоростях движения. В проведенных опытах таких условий не было, так как исследования проводились для условий свободного падения. К тому же из анализа экспериментов [41–43] можно заключить, что при таких скоростях движения высока вероятность существенной трансформации поверхности и последующего дробления капли.

Роль лучистого теплообмена капли жидкости с продуктами сгорания усиливается за счет непрозрачного включения с высокой приведенной степенью черноты. Моделирование [4,39,40] показало, что 30–40% приведенной лучистой энергии поглощается включением внутри капли. Остальная энергия расходуется на прогрев



**Рис. 7.** Времена существования капли воды (массой 10 mg) для случая с обволакиванием включения (1) и на подложке (2) при разных температурах газов.

и испарение воды на внешней (свободной) поверхности, а также внутренних границах раздела сред (у поверхности включения). Как следствие, можно сделать вывод о доминировании радиационной составляющей в механизмах теплообмена неоднородных капель жидкости с высокотемпературными продуктами сгорания.

Для оценки отличий времен полного испарения воды (с идентичной начальной массой) на подложке и вокруг включения при разных температурах нагрева проведены дополнительные эксперименты. Температура продуктов сгорания варьировалась в диапазоне от 300 до 650 K (аналогично методике [40]). На рис. 7 приведены основные результаты.

В области малых температур отклонения параметра  $\Delta\tau_h$  могут достигать 35 s (рис. 7). При повышении температуры отклонение интегрального параметра испарения нелинейно уменьшается (до 5 s при  $T_g \approx 650$  K). Выделенный эффект иллюстрирует тот факт, что для условий высоких температур газов (особенно при малых размерах капель) процессы парообразования для исследуемых систем могут характеризоваться близкими значениями  $\tau_h$ . Но при этом физика этих процессов существенно отличается (в основном по механизмам парообразования на границах раздела „жидкость–твёрдое тело“). В случае движущихся неоднородных капель определяющую роль играют времена их нахождения в высокотемпературной газовой среде. Именно этот фактор определяет возможность реализации испарения или кипения на внутренней и внешней границах раздела сред. Реализация одного или нескольких механизмов фазовых превращений предопределяет временные характеристики испарения жидкости. В отношении практического применения учет времени взаимодействия неоднородных капель жидкости и высокотемпературной газовой среды предполагает варьирование геометрических параметров включений (размеров и форм).

Полученные результаты расширяют современные представления об основных закономерностях испарения и кипения капель жидкости [44–48] в условиях интенсивного теплообмена. В то же время целесообразным яв-

ляется анализ определяющих процессов формирования парового слоя на границе „жидкость–твёрдая частица“ для изучения режима кипения на границах раздела сред в рассматриваемых условиях, а также поиска подходов для его интенсификации.

## Выводы

1. Варьирование площади поверхности включения существенно (до 20%) влияет на характеристики испарения неоднородных капель жидкости.

2. Увеличение начальной массы капли воды  $m_{w0}$  в составе неоднородной капли даже на 6 mg способствует снижению параметров  $\Delta m_w$  (до 90%) и  $\Delta R$  (до 50%).

3. Установлено определяющее влияние образования парового слоя на границе раздела сред „подложка–жидкость“ на времена существования испаряющейся с подложки капли воды (изменение  $\tau_h$  на 20% при росте начальной массы воды от 5 до 15 mg).

4. Выделенные отличия  $\Delta\tau_h$  при изменении температуры газов показывают, что для высокотемпературных газопарокапельных приложений допустимо различное расположение зоны контакта „твёрдое тело–жидкость“, при котором могут быть достигнуты близкие интегральные характеристики (скорости испарения и времена существования) парообразования. Однако условия кипения или испарения (формирования парового слоя, зарождения, роста и разрушения пузырьков и др.) при этом могут достаточно существенно отличаться.

5. Установленные особенности протекания рассматриваемых процессов позволяют прогнозировать условия и характеристики фазовых превращений неоднородных капель в высокотемпературных газовой среде (при различных условиях контакта с включениями и твёрдой поверхностью).

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

## Обозначения

$m_{w0}$  — начальная масса воды на подложке и вокруг включения, mg;

$m_w$  — масса воды вокруг включения после прохождения высокотемпературной газовой среды, mg;

$\Delta m_w$  — параметр, характеризующий уменьшение массы капли воды, mg;

$q_c, q_l$  — конвективный и лучистый тепловые потоки на поверхности капли, W/m<sup>2</sup>;

$R$  — радиус неоднородной капли после прохождения высокотемпературной газовой среды, mm;

$R_0$  — начальный радиус неоднородной капли, mm;

$\Delta R$  — параметр, характеризующий уменьшение размеров неоднородных капель в процессе испарения, mm;

$T_e$  — температура поверхности капли, K;

$T_g$  — температура продуктов сгорания, K;

$u_g$  — скорость движения потока высокотемпературных газов, m/s;

$\alpha$  — коэффициент теплообмена,  $W/(m^2K)$ ;  
 $\varepsilon$  — приведенная степень черноты;  
 $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $W/(m^2K^4)$ ;  
 $\tau$  — время, s;  
 $\tau_h$  — время существования капель воды для случая с обволакиванием включения и на подложке, s;  
 $\Delta\tau_h$  — параметр, характеризующий отличие времен полного испарения воды на подложке и вокруг включения, s;  
Nu, Pr, Re — безразмерные комплексы (числа Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса).

## Список литературы

- [1] Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 33–37.
- [2] Накоряков В.Е., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ДАН. 2015. Т. 464. Вып. 3. С. 293–296.
- [3] Ciloglu D., Bolukbasi A. // Nucl. Eng. Des. 2011. Vol. 241. N 7. P. 2519–2527.
- [4] Volkov R.S., Piskunov M.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // J. Heat Transfer. 2016. Vol. 138. N 1. P. 1–5.
- [5] Kim H., DeWitt G., McKrell T., Buongiorno J., Hu L.-W. // Int. J. Multiphase Flow. 2009. Vol. 35. N 5. P. 427–438.
- [6] Иценко А.Н. // Вода: химия и экология. 2010. Вып. 7. С. 2–5.
- [7] Вальдберг А.Ю., Макеева К.П. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. Вып. 5. С. 42–44.
- [8] Zhou X., D'Aniello S.P., Yu H.-Z. // Fire Saf. J. 2012. Vol. 54. P. 36–48. doi 10.1016/j.firesaf.2012.07.007
- [9] Никитин М.Н. // Промышленная энергетика. 2010. Вып. 12. С. 37–42.
- [10] Теория управления окомкованием сыпучих материалов / Под ред. Е.А. Исаев, И.Е. Чернецкой, Л.Н. Крахт, В.С. Титова. Старый Оскол, 2012. 384 с.
- [11] Обработка поверхностей в металлургии и машиностроении / Под ред. Б.Н. Марьина. Владивосток: Дальнаука, 2011. 421 с.
- [12] Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 16. С. 98–104.
- [13] Яламов Ю.И., Кузьмин М.К. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 3. С. 30–35.
- [14] Mollaret R., Sefiane K., Christy J.R.E., Veyret D. // Chem. Eng. Res. Des. 2004. Vol. 82. № 4. P. 471–480.
- [15] Girard F., Antoni M., Sefiane K. // Langmuir. 2010. Vol. 26. N 7. P. 4576–4580.
- [16] Erbil H.Y., McHale G., Newton M.I. // Langmuir. 2002. Vol. 18. N 7. P. 2636–2641.
- [17] Dmitrienko M.A., Piskunov M.V., Strizhak P.A., Shcherbinina A.A. // MATEC Web of Conferences. 2015. Vol. 23. 01064. P. 1–4.
- [18] Keane R.D., Adrian R.J. // Appl. Sci. Res. 1992. Vol. 49. N 3. P. 191–215.
- [19] Westerweel J. // Meas. Sci. Technol. 1997. Vol. 8. N 12. P. 1379–1392.
- [20] Foucaut J.M., Stanislas M. // Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 13. N 7. P. 1058–1071.
- [21] Janiszewski J. // Metrol. Measur. Sys. 2012. Vol. 19. N 2. P. 797–804.
- [22] Janiszewski J. // Int. J. Solids Struct. 2012. Vol. 49. N 7–8. P. 1001–1008.
- [23] Janiszewski J. // Solid State Phenom. 2013. Vol. 199. P. 297–302.
- [24] Leidenfrost J.G. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1966. Vol. 9. N 11. P. 1153–1166.
- [25] Gottfried B.S., Lee C.J., Bell K.J. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1966. Vol. 9. N 11. P. 1167–1188.
- [26] Biance A.-L., Clanet C., Quere D. // Phys. Fluids. 2003. Vol. 15. N 6. P. 1632–1637.
- [27] Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: ООО „Старс“, 2006. 720 с.
- [28] Touloukian Y.S., Powell R.W., Ho C.Y., Klemens P.G. Thermophysical Properties of Matter—The TPRC Data Series. Vol. 2. Thermal Conductivity—Nonmetallic Solids. New York: IFI/Plenum, 1971. 1302 p.
- [29] Терехов В.И., Пахомов М.А. Теплоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
- [30] Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Тепло-массообмен, термическое и термоэрозийное разрушение тепловой защиты. М.: Янус-К, 2011. 520 с.
- [31] Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах при фазовых превращениях. М.: МЭИ, 2014. 542 с.
- [32] Ranz W.E., Marshall W.R. // Chem. Eng. Prog. 1952. Vol. 48. N 3. P. 141–146, 173–180.
- [33] Fuchs N.A. Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media. London: Pergamon Press, 1959.
- [34] Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч. // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 5. С. 829–836.
- [35] Юренев В.Н., Лебедев П.Д. Теплотехнический справочник. 1976. Т. 2. 896 с.
- [36] Тепловой расчет котлов: нормативный метод. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: 1998. 256 с.
- [37] Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Int. J. Heat Mass Transf. 2014. Vol. 79. P. 838–845.
- [38] Кузнецов Г.В., Куйбин П.А., Стрижак П.А. // ТВТ. 2015. Т. 53. Т. 2. С. 264–269.
- [39] Высокоморная О.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А., Щербинина А.А. // ПЖВБ. 2015. Т. 24. № 7. С. 9–16.
- [40] Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. // Int. J. Heat Mass Transf. 2016. Vol. 92. P. 360–369.
- [41] Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Int. J. Heat Mass Transf. 2015. Vol. 85. P. 1–11.
- [42] Волков Р.С., Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 8. С. 15–22.
- [43] Волков Р.С., Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 10. С. 29–33.
- [44] Яламов Ю.И., Голикова Н.Н. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 2. С. 30–35.
- [45] Анохина Е.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 32–37.
- [46] Sazhin S.S., Elwardany A.E., Krutitskii P.A., Castanet G., Lemoine F., Sazhina E.M., Heikal M.R. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. Vol. 53. № 21–22. P. 4495–4505.
- [47] Sazhin S.S., Elwardany A.E., Krutitskii P.A., Depredurand V., Castanet G., Lemoine F., Sazhina E.M., Heikal M.R. // Int. J. Therm. Sci. 2011. Vol. 50. N 7. P. 1164–1180.
- [48] Sazhin S.S., Krutitskii P.A., Gusev I.G., Heikal M.R. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2011. Vol. 54. N 5–6. P. 1278–1288.