

ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЁРДЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ В ПОТОКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ

М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина

С использованием высокоскоростных средств видеорегистрации выполнены экспериментальные исследования процессов интенсивного парообразования при нагреве неоднородной капли воды с твёрдым непрозрачным включением (частицей графита) в среде высокотемпературных (400÷1000 К) газов. Выявлены два режима интенсивного испарения капли жидкости с твёрдым включением, возникновение которых при проведении экспериментов в идентичных условиях имеет вероятностный характер.

Ключевые слова: испарение, «взрывное» парообразование, неоднородная капля жидкости, твёрдое включение, высокотемпературная газовая среда.

Разработка методов интенсификации фазовых превращений жидкостей является актуальной научной задачей на протяжении многих лет [1–5]. Результаты таких исследований могут быть использованы в различных практических приложениях (особенно следует отметить энергетические направления). В последние годы довольно интенсивно проводятся исследования особенностей тепломассопереноса при испарении в высокотемпературных газовых средах [6, 7] одиночных капель и капельных потоков различных технологических жидкостей (в частности, воды, эмульсий и суспензий на её основе). Такой интерес объясняется широким распространением фазовых превращений выделенных жидкостей в большом перечне современных и перспективных технологий: формирование и использование двухфазных газопаровых теплоносителей [8, 9], тушение пожаров полидисперсными жидкостными составами [10, 11], термическая очистка сточных вод [12, 13], очистка технологических поверхностей энергетического оборудования [14, 15] и другие.

Интенсивность фазовых превращений является определяющим критерием эффективности тушения пожаров распылёнными составами [10, 11]. Помимо дробления капель и их стадийного распыления в качестве способа интенсификации испарения распылённых жидкостей в высокотемпературных газовых средах может быть рассмотрено введение в капли твёрдых не растворяющихся и непрозрачных включений. Экспериментальные исследования особенностей нагрева и испарения капель воды с твёрдыми углеродистыми включениями, существенно меньшими по размеру (чем капли), показали, что наличие взвешенных в жидкости частиц приводит к более быстрому её прогреву в газо-

вой среде [16–18]. Представляет интерес проведение исследований процессов нагрева и испарения в среде высокотемпературных (например, от 400 К до 1000 К – наиболее типичны для современных газопарокапельных технологий) газов капель жидкости с твёрдыми (соразмерными с последними) непрозрачными включениями.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование особенностей испарения капель воды с твёрдыми включениями в потоке высокотемпературных газов.

Для проведения экспериментов использовался стенд, оснащённый высокоскоростными (до 10^5 кадров в секунду) средствами видеорегистрации (рисунок 1). Генерирование гетерогенной капли осуществлялось путём обволакивания твёрдого непрозрачного включения 5, предварительно закреплённого на керамическом стержне 3, водой, испускаемой электронным дозатором 2. Сформированная таким образом неоднородная капля с использованием стержня 3 через одно из трёх отверстий вводилась в цилиндр с пламенем 8 (температура пламени контролировалась термомпарами 7). После ввода капли в пламя проводилась высокоскоростная видеосъёмка процесса её испарения с фиксацией изменения размеров неоднородной капли и толщины плёнки жидкости. Для регистрации исследуемых процессов применены две высокоскоростные (до 10^5 кадров в секунду) видеокамеры 11 («Phantom V411» и «Phantom-MiroM310»). Использование в данном эксперименте двух камер позволило получать 3D изображения испаряющихся капель и определять их характерные размеры по трём координатам.

Видеорегистрация с фиксацией изменения размеров капли (уменьшения объёма во-

ды, обволакивающей включение) и толщины плёнки жидкости (δ изменялась от $3 \cdot 10^{-2}$ до 2 мм) продолжалась в каждом эксперименте до полного испарения воды (толщина плёнки не превышала величины, сопоставимой с погрешностью средств измерения). Характерные размеры твёрдого включения в форме параллелепипеда составляли 2x2x3 мм. Настройки дозатора 2 позволили генерировать объем испускаемой жидкости в диапазоне от 5 до 15 мкл. Масса испускаемой дозатором 2 воды измерялась весами 1 и варьировалась от $5 \cdot 10^{-6}$ кг до $15 \cdot 10^{-6}$ кг. Равномерное обволакивание включения наблюдалось при массе $(5-7) \cdot 10^{-6}$ кг. Дальнейшее увеличение массы приводило к характерному «свисанию» жидкости.

Технический этиловый спирт применялся в качестве горючей жидкости, в продуктах сгорания которой проводились эксперименты. За счёт изменения параметров работы нагнетательной системы 12 и горелки 9 температура высокотемпературной газовой среды в цилиндре 8 поддерживалась на уровне 400-1000 К (максимальные отклонения относительно выделенного среднего значения достигали 30 К).

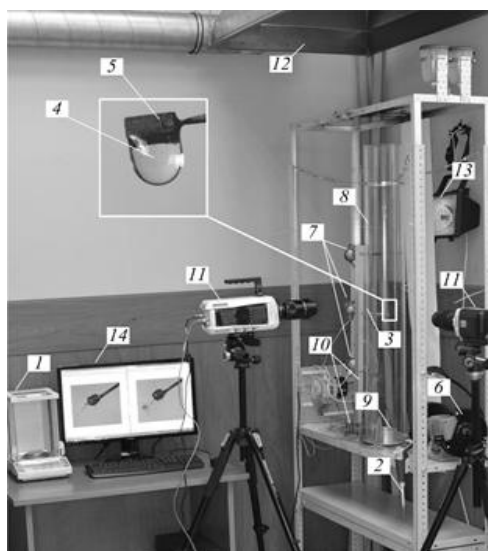


Рисунок 1 – Внешний вид экспериментального стенда:

- 1 – весы, 2 – дозатор,
- 3 – стержень (держатель включения),
- 4 – капля, 5 – включение, 6 – комплекс для изготовления включения, 7 – термпары,
- 8 – цилиндр из кварцевого стекла,
- 9 – горелка, 10 – передвижные механизмы,
- 11 – высокоскоростные камеры,
- 12 – нагнетательная система, 13 – прожектор,
- 14 – персональный компьютер (ПК)

Полученные видеogramмы обрабатывались с использованием программного обеспечения «PhantomCameraControl» для определения времён полного испарения жидкости неоднородной капли t_h .

Систематические погрешности средств измерения размеров включения и толщины плёнки не превышали 0,01 мм, массы – 0,5 % от измеряемой величины. Случайные (характеризующие повторяемость результатов измерений) погрешности определения δ составили не более 7 %. Погрешность определения времён t_h не превысила 0,5 мс.

Эксперименты проводились с неоднородными каплями, объём жидкости в которых составлял от 5 до 15 мкл, размеры включения 2,5x1,5 мм. Следует отметить, что при объёме жидкости до 7 мкл последняя полностью обволакивала твёрдое включение, образуя плёнку равномерной толщины. Использовались частицы графита в форме параллелепипеда и многогранника. В качестве горючей жидкости, в продуктах сгорания которого проводились эксперименты, применялся технический этиловый спирт. Температура продуктов сгорания изменялась в диапазоне от 400 до 1000 К (максимальные отклонения относительно выделенного среднего значения достигали 30 К) за счёт изменения параметров работы нагнетательной системы и используемой горелки.

В результате проведения экспериментальных исследований (в идентичных по условиям опытах) были выделены два механизма испарения плёнки жидкости при нагреве неоднородной капли в высокотемпературной газовой среде. Первый механизм (рисунок 2) характеризовался испарением жидкости только с внешней поверхности неоднородной капли. При реализации второго механизма (рисунок 3) помимо испарения и убыли массы жидкости с внешней (свободной) поверхности капли происходило формирование очагов парообразования на внутренней границе раздела сред «твёрдое включение – жидкость».

Реализация установленных механизмов испарения имеет вероятностный характер (оба режима зарегистрированы в одинаковых условиях экспериментов). Возникновение паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред, возможно, объясняется неравномерным прогревом твёрдого включения при его контакте с газовой средой в проведённых экспериментах. Процессы образования продуктов сгорания при горении практически любых жидких топлив характеризуются нестационарными условиями (скорости движения

ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЁРДЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ В ПОТОКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ

продуктов сгорания и их температуры могут изменяться в пределах 10–15 % при идентичных внешних условиях). Это приводит к тому, что несколько отличаются условия прогрева как жидкости, так и включения. Так как теплопроводность материала включения выше, чем воды, то вклад процесса прогрева включения в реализацию испарения жидкости является определяющим. К тому же, выполненные численные оценки [18] показали, что включение интенсивнее разогревается, чем вода и за счёт аккумуляции подведённой через жидкость энергии излучения. Выделенные условия довольно типичны для газопарокапельных гетерогенных потоков [6, 19], соответствующих рассмотренным выше технологиям. Поэтому целесообразно учитывать возможность реализации двух режимов протекания выделенных процессов.

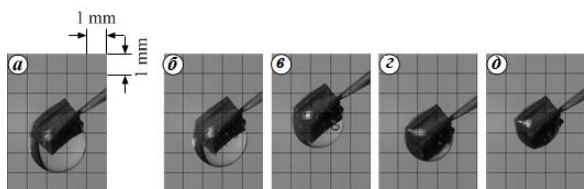


Рисунок – 2. Типичные видеокadres испарения капли воды (начальный объём 15 мкл) с твёрдым включением (механизм без формирования паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред) при температуре газовой среды около 500 К:
а – $t=1,015$ с, б – $t=3,011$ с, в – $t=5,017$ с,
г – $t=7,025$ с, д – $t=9,016$ с

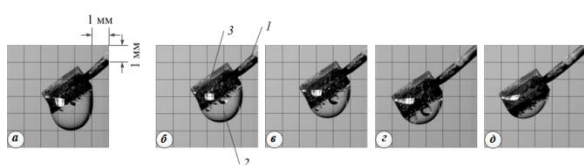


Рисунок – 3. Типичные видеокadres испарения капли воды (начальный объём 15 мкл) с твёрдым включением (механизм с формированием паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред) при температуре газовой среды около 500 К:
а – $t=0,001$ с, б – $t=1,638$ с, в – $t=3,628$ с,
г – $t=5,883$ с, д – $t=8,102$ с

На рисунке 4 представлены времена существования (полного испарения) неоднородных капель воды от температуры газовой среды. Как и можно было предположить, с повышением температуры газовой среды испарение плёнки жидкости происходит более интенсивно.

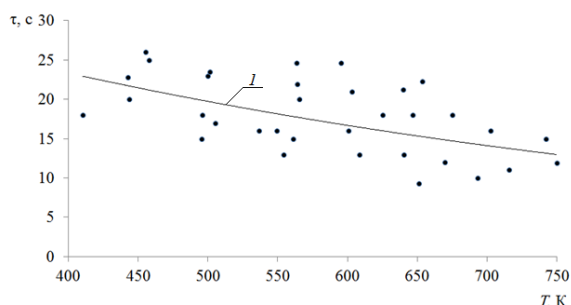


Рисунок 4 – Времена существования (полного испарения) неоднородных капель жидкости (начальный объём воды 15 мкл) от температуры газовой среды при испарении с внешней поверхности капли:
1 – аппроксимация экспериментальных значений

Следует отметить, что при нагреве неоднородных капель воды в газовой среде с температурой выше 750÷800 К зарегистрирован эффект их «взрывного» разрушения с «вскипанием» жидкости и расходом плёнки на более мелкие капли (рисунок 5). Такой эффект возникает вследствие значительного прогрева твёрдой частицы со стороны контакта с газовой средой, а также вследствие пропуска плёнкой воды энергии излучения высокотемпературных продуктов сгорания топлива к внутренней границе раздела сред «включение – жидкость». Разрушению неоднородной капли предшествовало испарение со свободной поверхности плёнки жидкости, образование, значительное увеличение в объёме и слияние паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред.

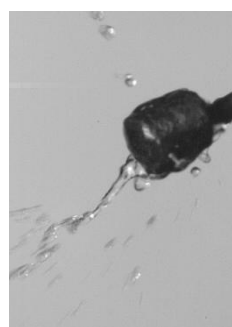


Рисунок 5 – Характерный кадр видеogramмы с «взрывным» разрушением неоднородной капли воды (начальный объём 5 мкл) и образование группы мелких капель (температура газовой среды около 800 К)

Результаты проведённых исследований хорошо соответствуют данным проведённых ранее экспериментов для изучения нагрева и испарения капель жидкости с взвешенными

мелкодисперсными непрозрачными частицами [16–18]. В частности, наличие твёрдых непрозрачных включений интенсифицирует прогрев жидкости вокруг них [16–18]. В условиях высоких температур газов этот процесс приводит к формированию паровых слоёв у внутренних границ «жидкость – включение» [16–18]. Зарождение последних приводит к интенсификации парообразования в целом.

Выявленные в экспериментальных исследованиях особенности нагрева и испарения в высокотемпературной газовой среде неоднородных капель жидкости эффекты могут быть использованы в различных технологиях в соответствии с их спецификой. Так, например, установленные особенности испарения неоднородных капель с твёрдым включением со свободной поверхности могут быть использованы для интенсификации фазовых превращений на производствах, целью которых является разделение компонентов капли (в частности, в технологиях термической очистки воды от твёрдых включений и различных примесей). Эффект «взрывного» разрушения капель может быть использован, например, при полидисперсном пожаротушении, где требуется быстрое и интенсивное испарение тушащего состава для снижения температуры очага возгорания и вытеснения в газовой среде вступающих в реакцию окисления компонентов.

При проведении экспериментальных исследований с использованием высокоскоростных средств видеорегистрации установлены особенности нагрева и испарения капель воды с твёрдым включением (частицей графита), соразмерным с каплей жидкости. Выявлено два механизма испарения (при температуре газов менее 800 К) неоднородных капель со свободной поверхности (с образованием и без образования паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред), возникновение которых носит вероятностный характер и обусловлено неравномерным прогревом включения газовой средой. Также установлена возможность (при температуре газов более 800 К) «взрывного» распада неоднородных капель в высокотемпературной газовой среде с образованием более мелких капель жидкости.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sazhin, S. S. Multi-component droplet heating and evaporation: numerical simulation versus

experimental data / S. S. Sazhin, A. E. Elwardany, P. A. Krutitskii, V. Depredurand, G. Castanet, F. Lemoine, E. M. Sazhina, M. R. Heikal // *International Journal of Thermal Science*. – 2011. – V. 50. – P. 1164–1180.

2. Kuznetsov, V. V. Explosive vaporization of a water layer on a flat microheater / V. V. Kuznetsov, A. Kozulin // *Journal of Engineering Thermo physics*. – 2010. – V. 19, Iss. 2. – P. 102–109.

3. Авдеев, А. А. Кинетический анализ интенсивного испарения (метод обратных балансов) / А. А. Авдеев, Ю. Б. Зудин // *Теплофизика высоких температур*. – 2012. – Т. 50, № 4. – С. 565–574.

4. Aktershev, S. P. Modeling of the vaporization front on a heater surface / S. P. Aktershev, V. V. Ovchinnikov // *Journal of Engineering Thermo physics*. – 2011. – V. 20, Iss. 1. – P. 77–88.

5. Kuznetsov, G. V. Estimation of the Numerical Values of the Evaporation Constants of the Water Drops Moving in the High Temperature Gas Flow / G. V. Kuznetsov, P. A. Kuibin, P. A. Strizhak // *High Temperature*. – 2015. – V. 53, № 2. – P. 254–258.

6. Варксин, А. Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения / А. Ю. Варксин // *Теплофизика высоких температур*. – 2013. – Т. 51, № 3. – С. 421–455.

7. Volkov, R. S. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow / R. S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 79. – P. 838–845.

8. Никитин, М. Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси / М. Н. Никитин // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 6. – С. 42–46.

9. Никитин, М. Н. Использование парогазовой смеси при сжигании топлива / М. Н. Никитин // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 12. – С. 37–42.

10. Korobeinichev, O. P. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology / O. P. Korobeinichev, A. G. Shmakov, V. M. Shvartsberg, A. A. Chernov, S. A. Yakimov, K. P. Koutsenogii, V. I. Makarov // *Fire Safety Journal*. – 2012. – V. 51. – P. 102–109.

11. Xiao, X. K. On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet / X. K. Xiao, B. H. Cong, X. S. Wang, K. Q. Kuang, K. K. Yuen, G. X. Liao // *Journal of Fire Sciences*. – 2011. – V. 29, № 4. – P. 339–360.

12. Тулепбаев, В. Б. Применение вакуумных выпаривателей для очистки сточных вод гальванического производства / В. Б. Тулепбаев, И. Ю. Дьяченко // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2008. – Т. XVI, № 1. – С. 40–45.

13. Вальдберг, А. Ю. Механические форсунки для подвода жидкости в газоочистные аппараты / А. Ю. Вальдберг, К. П. Макеева // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2010. – № 5. – С. 42–44.

14. Ибатуллин, И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв / И. Д. Ибатуллин. – Самара : СГТУ, 2008.

ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТВЁРДЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ В ПОТОКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ

15. Марьин, Б. Н. Обработка поверхностей в металлургии и машиностроении / Б. Н. Марьин, В. А. Ким, О. Е. Сысоев. – Владивосток : Дальнаука, 2011.

16. Volkov, R. S. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area / R. S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // International journal of thermal science. – 2015. – V. 88. – P. 193–200.

17. Vysokomornaya, O. V. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone / O. V. Vysokomornaya, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // Fire Safety Journal. – 2014. – V. 70. – P. 61–70.

18. Волков, Р. С. Влияние твёрдых включений в каплях жидкости на характеристики их испарения при движении через высокотемпературную газовую среду / Р. С. Волков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 33–37.

19. Вараксин, А. Ю. Кластеризация частиц в турбулентных и вихревых двухфазных потоках / А. Ю. Вараксин // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 5. – С. 777–796.

Максим Владимирович Пискунов – аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, piskunovmv@tpu.ru.

Стрижак Павел Александрович – доктор физ.-мат. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, pavelspa@tpu.ru.

Щербинина Анастасия Анатольевна – аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, nushenka17@gmail.com.