

ИСПАРЕНИЕ И «ВЗРЫВНОЕ» ПАРООБРАЗОВАНИЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ С ТВЕРДЫМ НЕПРОЗРАЧНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Пискунов М.В., Щербинина А.А.

Научный руководитель: Стрижак П.А., профессор, д.ф.-м.н.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: piskunovmv@tpu.ru

EVAPORATION AND EXPLOSIVE VAPOR FORMATION OF A LIQUID DROPLET WITH A SOLID NONTRANSPARENT INCLUSION IN A HIGH-TEMPERATURE GASEOUS REGION

Piskunov M.V., Shcherbinina A.A.

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Strizhak P.A.
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: piskunovmv@tpu.ru

Abstract. *Radiant heat flux impact on phase change conditions of a water droplet with a solid inclusion heated in a high-temperature gas flow was experimentally determined using «solid inclusion - water» system as an example. It was emphasized the evaporation from the outer surface, boiling at the internal «inclusion – water droplet» interface and explosive breakup of a heterogeneous water droplet. A full evaporation time comparison of heterogeneous droplet heated in combustion products and air at the same temperatures was carried out.*

В настоящее время вода является важнейшим энергетическим ресурсом [1], поэтому в различных сферах жизнедеятельности внедряются программы повышения эффективности использования воды. Такие программы находят свое применение в системах очистки воды на производствах, при тушении помещений тонкораспыленной водой, при создании теплоносителей на базе дымовых газов, капель воды, а также водяного пара и т.д. Так или иначе, эти технологии позволяют неоднократно (циклически) использовать водный ресурс и снижать его потребление до минимума. Интенсивное развитие технологий термической очистки воды и эмульсий на ее основе связано, в первую очередь, с невысокой эффективностью существующих систем очистки воды.

Принцип действия современных систем термической очистки основан на достижении условий фазовых превращений (парообразования) жидкости [2], реализуемых за счет применения в качестве газовой среды продуктов сгорания горючих жидкостей или газов, а также разогретого воздуха. Таким образом, возникает проблема, характеризующаяся нехваткой экспериментальной информации об условиях осуществления механизмов парообразования при нагреве неоднородных капель жидкостей (с твердыми частицами) в условиях, типичных для систем термической очистки воды.

Условия испарения и парообразования гетерогенных (неоднородных) и однородных капель в высокотемпературной (около 1100 К) газовой среде, как показали эксперименты [3], значительно различаются. Эксперименты [3] выполнены только при условии введения в капли групп включений (варьируя концентрацию и размеры). Целесообразным представляется экспериментальное исследование нагрева одиночной капли воды с одним соразмерным включением.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование особенностей испарения и «взрывного» парообразования капли воды с твердым непрозрачным включением при нагреве в высокотемпературной газовой среде.

В целях оценки влияния пропускания излучения газов прозрачной жидкостью на условия ее фазовых превращений для проведения исследований использовался стенд со сменным источником

генерации высокотемпературной газовой среды.

При использовании тепловой пушки исследовался процесс испарения и парообразования неоднородной капли воды в разогретом до контролируемой температуры воздухе. Меняя источник генерации газовой среды на горелку, обеспечивались условия нагрева капель воды в продуктах сгорания типичного жидкого горючего вещества – технического спирта. Настоящее исследование, в отличие от экспериментов [3], проводилось с применением высокоскоростной видеорегистрации процесса фазовых превращений неоднородной капли, закрепленной на керамическом стержне. Две высокоскоростные (до 10^5 кадров в секунду) видеокамеры обеспечивали процесс видеорегистрации. Обработка полученных видеogramм проводилась с применением программного обеспечения «ТЕМА Automotive», визуализация исследуемых процессов – «Phantom Camera Control».

Методика проведения экспериментальных исследований включала два этапа. Первый (подготовительный) этап – взвешивание капель дистиллированной воды (необходимая масса 15 мг) с помощью весов и изготовление твердого включения (материал – графит) с применением набора надфилей. Манипуляции по транспортировке капель воды заданного объема выполнялись с помощью электронного дозатора. Керамический стержень перемещался в высокотемпературную среду посредством автоматизированных передвижных механизмов. Второй этап – непосредственное проведение исследования процесса фазовых превращений капли воды с твердым включением. Высокотемпературная газовая среда генерировалась в полости цилиндра (длиной 1 м) из кварцевого стекла. В случае использования в качестве газовой среды продуктов сгорания горючей жидкости неоднородная капля вводилась в одно из трех отверстий цилиндрического канала в зависимости от требуемой температуры. При применении тепловой пушки необходимая температура среды устанавливалась на блоке управления и поддерживалась на заданном уровне до завершения опыта. Непосредственно после ввода капли в газовую среду производилась видеорегистрация с фиксацией изменения размеров капли (d) и толщины пленки жидкости (δ) до полного испарения воды с поверхности включения. Также определялись времена существования τ_h капли жидкости.

Систематические погрешности средств измерения размеров включения, капли воды и толщины пленки не превышали 0.01 мм. Случайные погрешности определения d и δ , характеризующие повторяемость результатов измерений, составили не более 7 % относительно среднего для серии при идентичных начальных условиях. Погрешности определения времен τ_h не превысили 1 мс.

Установлено, что для проведенных опытов с продуктами сгорания и в разогретом воздухе при высоких температурах (более 550 К) рост парового слоя на границе раздела сред «твердое включение – капля воды» реализуется фактически мгновенно (как правило, менее 1 с). Во всех случаях при меньших температурах наблюдалось только испарение со свободной поверхности капли воды. Рис. 1 иллюстрирует установленные зависимости характерных времен существования неоднородных капель воды.

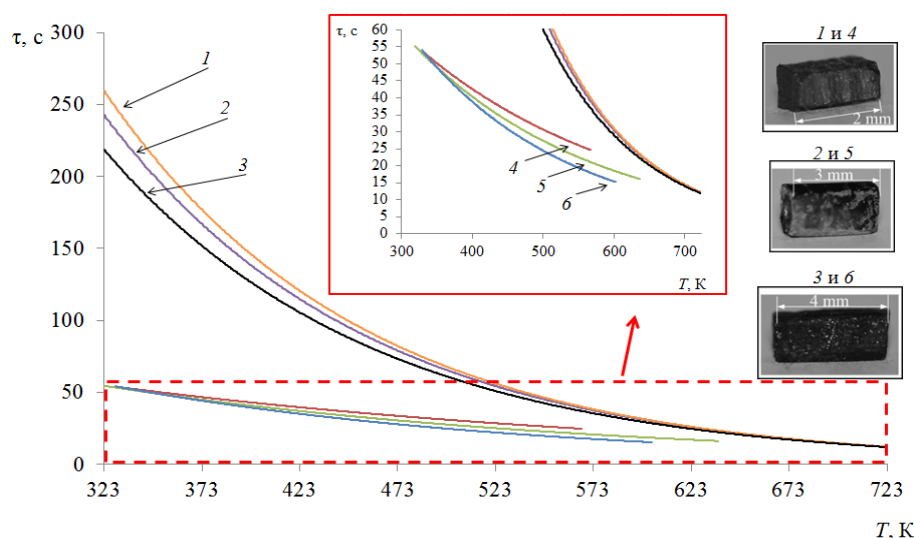


Рис. 1. Времена существования (полного испарения) неоднородных (с учетом варьирования размера включения) капель воды при разных температурах воздуха (1-3) и продуктов сгорания (4-6)

Эксперименты, проведенные в разогретом воздухе (1-3) при температурах менее 550 К, реализуются при больших временах полного испарения жидкости с поверхности включения в сравнении с аналогичными опытами, проведенными в потоке продуктов сгорания спирта (4-6). Такая существенная разница связана, в первую очередь, с подводом тепла посредством лучистого теплового потока в случае испарения капли в потоке продуктов сгорания спирта. При температурах более 550 К разница во временах существования неоднородных капель становится незначительной.

Стоит отметить, что при проведении экспериментов регистрировались разрушения (распады) гетерогенных капель вследствие интенсивного парообразования только в случае нагрева капли в потоке продуктов сгорания спирта при температурах более 600 К. Это также позволяет утверждать о влиянии энергии излучения на процесс теплообмена в системе «гетерогенная капля – газовая среда».

Результаты проведенных экспериментов с продуктами сгорания и разогретым воздухом позволили установить роль энергии излучения при реализации фазовых превращений неоднородных капель воды в высокотемпературных газовых средах. Существенное влияние радиационного теплообмена способствует достижению условий «взрывного» вскипания и разрушения капли жидкости. Кроме термической очистки воды, выявленные особенности представляют интерес для большой группы газопарокапельных технологий (например, полидисперсное пожаротушение).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ищенко А.Н. Актуальные проблемы мониторинга водных объектов // Вода: химия и экология. – 2010. – № 7. – С. 2-5.
2. Тулепбаев В.Б., Дьяченко И.Ю. Применение вакуумных выпаривателей для очистки сточных вод гальванического производства // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2008. – Т. 16. – № 1. – С. 40-45.
3. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of solid inclusions in liquid drops moving through a high temperature gaseous medium on their evaporation // Technical Physics. – 2014. – V. 59. – № 12. – P. 1770–1774.