

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ НА УСЛОВИЯ ВСКИПАНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ ВОДЫ

А.Г. Борисова, О.В. Высокоморная, М.В. Пискунов

С применением средств высокоскоростной видеорегистрации проведены экспериментальные исследования процессов интенсивного прогрева, вскипания и взрывного дробления неоднородных капель воды (содержащих одиночные частицы графита). С применением сканирующего микроскопа получены изображения поверхности графитовых включений до и после реализации на их поверхности интенсивного парообразования пленки воды с ее взрывным разрушением. Выявлено, что в исходном состоянии поверхность графита имеет довольно равномерную мелкопористую (до 10 мкм) структуру, способствующую зарождению и развитию локальных очагов парообразования. Показано, что структура поверхности графитовых частиц в процессе взрывного распада пленки воды подвергается значительной трансформации (возникают крупные неоднородности с характерными размерами до 170 мкм), вследствие чего условия взрывного разрушения неоднородных капель с такими включениями не реализуются.

Ключевые слова: неоднородная капля, графитовая частица, взрывное разрушение, дробление, испарение, структура поверхности.

Технологии интенсивного испарения и вскипания жидкостей в капельном состоянии находят широкое применение в различных сферах (пожаротушение [1, 2], парогазовые энергетические установки [3, 4], термическое обезвреживание сточных и технологических вод [5], концентрирование жидкостных растворов, эмульсий и суспензий [6], испарительное охлаждение технологических поверхностей и сред [7] и др.). Идея повышения полноты испарения капель в газовых средах за счет их измельчения (дробления) вследствие введения твердых непрозрачных неоднородностей – включений (частиц с размерами, соизмеримыми с размером капли) является относительно новой. Теоретические основы такой технологии не проработаны.

В [8] выполнен анализ особенностей и характеристик взрывного распада капель воды с твердым графитовым включением в высокотемпературных (свыше 800 К) газах. Эксперименты с использованием методов высокоскоростной видеорегистрации [8] позволили установить стадии, предшествующие взрывному разрушению неоднородных капель, а также сформулировать выводы о механизме возникновения этого явления: энергия теплового излучения от высокотемпературных газов и стенок канала, в котором осуществляется теплообмен, проходит через слой воды и аккумулируется у

поверхности твердой непрозрачной частицы. Вода является инертной средой для излучения в инфракрасном спектре [9]. В зоне контакта частицы с пленкой воды начинается рост паровых пузырьков, что приводит к разрушению жидкостной оболочки капли и ее распаду на более мелкие фрагменты. Показано [8], что после взрывного разрушения и образования совокупности более мелких элементов жидкости площадь поверхности теплообмена увеличивается в 4–15 раз. В этом и заключается эффект интенсификации испарения при использовании такой технологии.

В работе [8] получены экспериментальные зависимости времен существования неоднородных капель воды от температуры газов. Исследовано [8] влияние условий теплообмена (при варьировании соотношения конвективного, кондуктивного и радиационного тепловых потоков) на интенсивность испарения воды. Согласно представлениям современной теории испарения и кипения жидкостей большое значение для зарождения и последующего роста центров парообразования, предшествующего взрывному дроблению неоднородных капель, имеет структура поверхности нагрева (в данном случае, структура поверхности твердого включения). Шероховатая поверхность способствует формированию большого числа паровых пузырьков, а

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ НА УСЛОВИЯ ВСКИПАНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ ВОДЫ

находящиеся в микропорах пузырьки воздуха также интенсифицируют парообразование. Влияние структуры поверхности включения неоднородной капли до настоящего времени остается неизученным. Это несколько ограничивает область применения разрабатываемых прогностических моделей взрывного испарения неоднородных капель.

Цель настоящей работы – экспериментальное изучение влияния структуры пористого каркаса включения на условия парообразования неоднородной капли воды.

Исследования проводились с использованием стенда, схема которого представлена на рисунке 1. Нагрев капли воды с графитовым включением осуществлялся в керамической камере муфельной печи, температура воздуха в которой варьировалась от 500 до 1000 К.

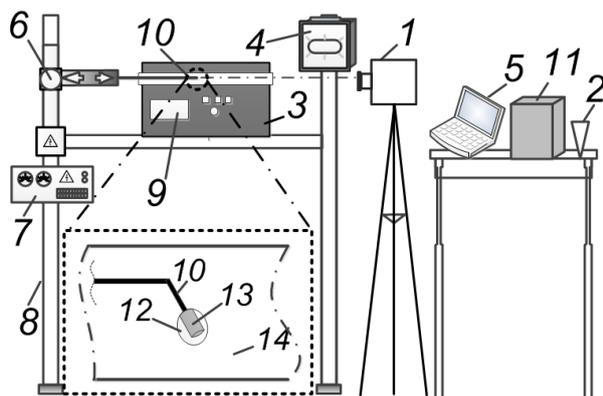


Рисунок 1 - Схематическое изображение экспериментального стенда с трубчатой муфельной печью в качестве устройства для генерации высокотемпературной газовой среды: 1 – высокоскоростная камера; 2 – дозирующее устройство; 3 – муфельная печь; 4 – прожектор; 5 – компьютер; 6 – мехатронное координатное устройство (МКУ); 7 – блок питания МКУ; 8 – алюминиевая стойка; 9 – регулятор температуры нагрева; 10 – керамический стержень; 11 – аналитические весы; 12 – капля воды; 13 – твердое включение; 14 – полость трубки нагрева печи

Неоднородная капля формировалась за счет обволакивания цилиндрической графитовой частицы (размер $2 \times 2 \times 3$ мм; удельная теплоемкость $c_p \approx 6980$ Дж/(кг·К); теплопроводность $\lambda \approx 180$ Вт/(м·К); плотность $\rho \approx 1730$ кг/м³ [10, 11]) пленкой воды (объем $10 \div 15$ мкл, генерировался дозатором). Включение закреплялось на тонком (диаметр 0.6 мм) держателе (керамическом стержне),

который позволял перемещать каплю в нагревательную камеру. Сформированная таким образом система помещалась в центр нагревательной трубки с помощью мехатронного координатного устройства. Процессы нагрева, испарения и взрывного распада неоднородной капли регистрировались через сквозное отверстие в трубке муфельной печи с использованием высокоскоростной видеокамеры (максимальное разрешение видеосъемки 1280×800 пикселей, максимальная скорость записи видеоматериала при уменьшенном разрешении $6 \cdot 10^5$ кадров/с). Анализ полученных видеogramм осуществлялся с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control. Определялись времена, характерные стадиям исследуемого процесса: интенсивное испарение со свободной поверхности капли, зарождение и развитие паровых пузырьков на внутренней границе раздела сред, взрывное дробление неоднородной капли.

Начальная температура воды контролировалась хромель-копелевой термопарой (тип L, диапазон измеряемых температур 223–873 К, класс точности 2, систематическая погрешность измерения температуры 2.5 К) и составляла около 300 К.

Эксперименты проводились сериями (не менее 10 опытов в серии) при идентичных условиях нагрева капель. Методика определения погрешностей измерений в проведенных экспериментах аналогична описанной в работе [8].

Для определения масштабов влияния структуры поверхности твердого включения на условия и характеристики возникновения эффекта взрывного распада неоднородных капель при нагреве в газовой среде исследования проводились с использованием вновь изготовленных частиц графита, а также с повторно используемыми (после взрывного дробления пленки воды на их поверхности в предшествующих экспериментах) твердыми включениями. Данные включения существенно отличались по структуре поверхности: равномерная мелкодисперсная пористость соответствовала частице до термического нагрева и существенно неравномерная – после нагрева.

На рисунке 2 представлены видеокадры нагрева неоднородной капли с твердым включением, изготовленным перед проведением эксперимента. Кадры с увеличенной в 200 раз поверхностью графитовой частицы (рис. 2, б) получены при

помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM3000.

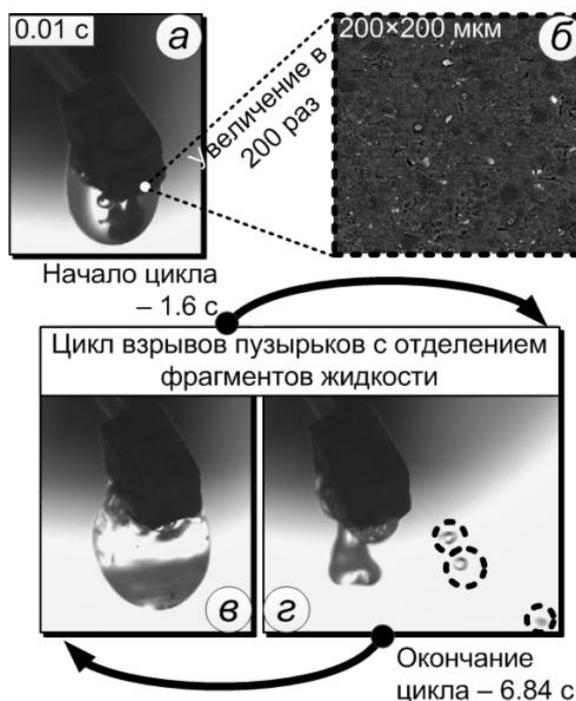


Рисунок 2 - Типичные видеокадры интенсивного парообразования воды (в, г) на внутренней границе раздела сред (поверхности (б) с равномерной пористостью) неоднородной капли с последующим циклическим отделением пароводяных фрагментов от пленки жидкости: а – капля воды с твердым включением, ранее не подвергнутом термическому воздействию, на стадии начала прогрева; начальный объем воды 15 мкл, размер включения 2×2×3 мм, температура нагрева 950 К

На поверхности твердого включения видны небольшие (в среднем размером до 10×10 мкм) равномерно распределенные элементы пористости. Такая структура поверхности является благоприятной для зарождения центров парообразования (рис. 2, а, в), поскольку способствует преодолению сил межмолекулярного притяжения воды. Кроме того, в микропорах на поверхности твердого включения содержится воздух, наличие которого также значительно интенсифицирует процесс образования пузырьков при перегреве воды (вследствие контакта с разогретой за счет поглощения теплового излучения поверхностью графита). По мере дальнейшего нахождения неоднородной капли в камере муфельной печи у границы раздела сред внутри капли аккумулируется все большее количество тепла. При этом

прогрев графитовой частицы вглубь незначителен вследствие невысокого значения коэффициента теплопроводности. Объем испарившейся воды продолжает увеличиваться, паровые пузырьки растут (рис. 2, в), и при достижении критического объема (когда силы давления пара превышают силы поверхностного натяжения оболочки пузыря) происходит их схлопывание с образованием более мелких фрагментов жидкости (рис. 2, г).

Пороговыми значениями температуры нагрева, при которых начал устойчиво реализовываться эффект взрывного распада капель, являются 780–800 К. При более низких значениях температуры нагрева наблюдалось интенсивное испарение воды лишь со свободной поверхности (без парообразования на внутренней границе раздела сред). Это отчасти объясняется недостаточной для возникновения взрывного дробления величиной радиационного теплового потока от разогретых керамических стенок нагревательной камеры к поглощающей излучение графитовой частице в составе неоднородной капли.

Рисунок 3 иллюстрирует кадры, характерные основным стадиям нагрева и испарения неоднородной капли при повторном использовании графитовой частицы (т.е. после реализации эффекта взрывного распада пленки воды на поверхности включения) для ее формирования.

Следует отметить, что взрывное разрушение капель, сформированных таким образом, не зарегистрировано в проведенных экспериментах даже при температуре нагрева более 780–800 К. Это связано с изменениями структуры поверхности графита после интенсивного парообразования воды на его поверхности (рис. 3, б). Сканирование микроскопом поверхности графитовой частицы после взрывного распада неоднородной капли позволило установить появление крупных (около 170×150 мкм) неоднородностей («кратеров»), которые, очевидно, образовались в результате слияния десятков и даже сотен мелких пор на поверхности графита в процессе нагрева и интенсивного парообразования на поверхности частицы в предшествующем эксперименте (рис. 2). Относительно крупные и немногочисленные неоднородности на поверхности твердой частицы не позволяют сформироваться достаточному количеству очагов интенсивного парообразования,

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ НА УСЛОВИЯ ВСКИПАНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ ВОДЫ

которые привели бы к возникновению эффекта взрывного разрушения капель.

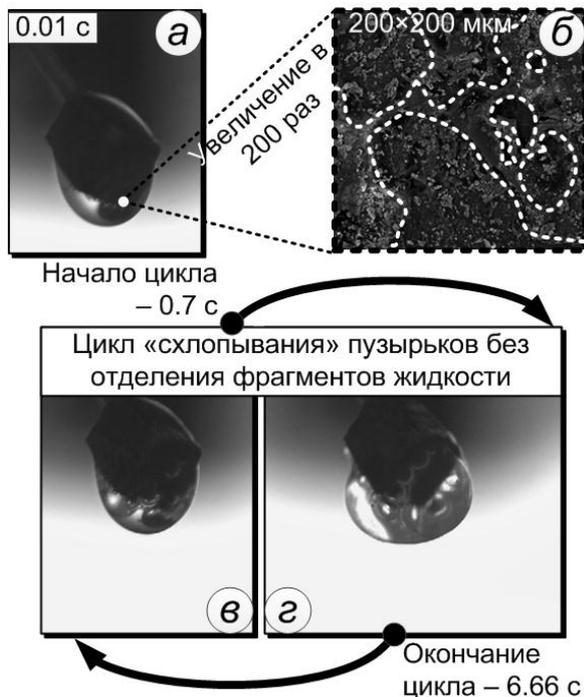


Рисунок 3 - Типичные видеокadres умеренного парообразования воды (в, г) на внутренней границе раздела сред (поверхности (б) с существенно отличными по размерам порами) неоднородной капли без эффекта отделения пароводяных фрагментов от пленки жидкости: а – капля воды с твердым включением, на котором ранее происходило парообразование жидкости, на стадии начала прогрева; начальный объем воды 10 мкл, размер включения 2×2×3 мм, температура нагрева 950 К

Кроме того, микрообъемы воздуха, являющиеся дополнительным фактором, способствующим возникновению взрывного распада неоднородной, капли, содержатся в порах графитовой частицы в существенно меньшем количестве при ее повторном использовании в опытах, что также отчасти объясняет полученный экспериментальный результат.

На рисунке 4 приведены зависимости времен существования (полного испарения) неоднородных капель при первичном (кривая 1) и повторном использовании графитовых частиц (кривая 2). Меньшие времена испарения зарегистрированы в экспериментах с повторным использованием графитовой частицы в качестве твердого

включения неоднородной капли. В диапазоне температур газовой среды $T_g \approx 500-770$ К разница значений t_h для двух исследованных режимов испарения достигала 10 с. Вероятно, такой результат можно объяснить большей суммарной площадью поверхности графитовой частицы при повторном ее использовании в экспериментах (за счет появления крупных неоднородностей), что является причиной формирования пленки воды меньшей толщины (при постоянном объеме) и ускорению ее прогрева со стороны греющей среды – разогретого воздуха и стенок камеры мuffleной печи.

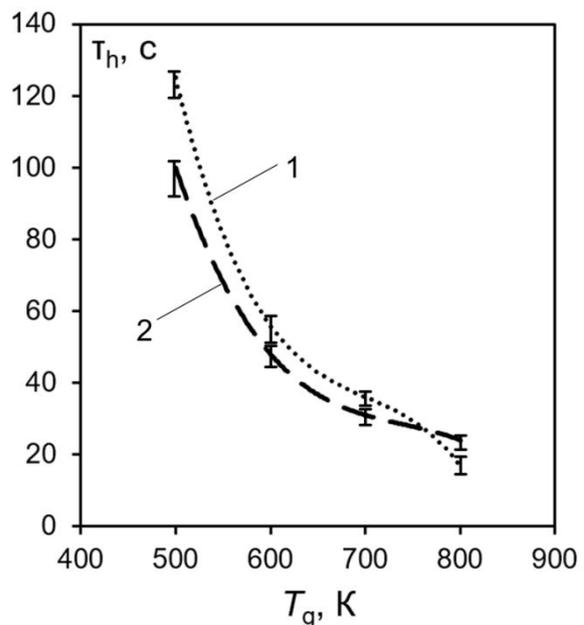


Рисунок 4 - Времена существования (полного испарения) капель воды (начальный объем 10 мкл) с твердыми включениями: 1 – ранее не подвергнутыми термическому воздействию; 2 – уже подвергшимися термическому воздействию

При температуре газовой среды $T_g > 780$ К меньшие времена существования (полного испарения) капель начинают соответствовать схеме эксперимента с использованием новых включений (рис. 2). Очевидно, такой результат связан с возникновением в указанном температурном диапазоне эффекта взрывного измельчения (разрушения) неоднородных капель, который был зафиксирован в экспериментах только при первичном использовании графитовых частиц.

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сформулировать вывод об определяющей

роли структуры поверхности твердого включения в устойчивой реализации взрывного распада пленки воды при нагреве неоднородной капли в высокотемпературной газовой среде. Полученные экспериментальные результаты позволяют утверждать, что для дробления капли на более мелкие жидкостные фрагменты необходимо в качестве материала твердого включения выбирать частицы, структура поверхности которых представлена многочисленными микропорами. Однако в условиях нагрева неоднородных капель при температурах ниже пороговых для взрывного дробления ($T_0 < 780$ К) целесообразно использовать частицы с относительно крупными неоднородностями на поверхности, поскольку это способствует формированию более тонкой пленки воды, ее ускоренному прогреву и интенсификации испарения в целом.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект № МД-1221.2017.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М., Малкин В.Л., Колосов В.А., Ильичев В.В. Отечественный и зарубежный опыт применения водяного орошения для противопожарной защиты технологического оборудования и строительных конструкций // Пожарная безопасность. 2016. № 2. С. 128–137.
2. Цой А.С., Снегирёв А.Ю. Водяные завесы: анализ нормативной базы и численное моделирование // Пожарная безопасность. 2015. № 3. С. 100–108.
3. Девянин А.В., Цанев С.В., Буров В.Д. Оптимизация параметров тепловых схем конденсационных и теплофикационных пгу с котлами-утилизаторами трех давлений // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 1. С. 23–27.
4. Ильин Р.А., Пастухов О.В. Оценка эффективности современных бинарных установок // Промышленная энергетика. 2013. № 6. С. 43–44.
5. Ширинкина Е.С., Вайсман Я.И., Житнюк В.А., Монченко С.В. Ресурсосберегающая технология обращения с отходами переработки макулатурной массы // Экология и промышленность России. 2015. № 7. С. 10–15.
6. Афанасьев К.Ю., Чухарева Н.В. Использование контактного выпарного аппарата для концентрирования стоков электрообессоливающих установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 3. С. 426–430.
7. Городилов А.А., Пушнов А.С., Беренгартен М.Г. Методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в регулярных насадках // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. Т. 89. № 3. С. 45–51.
8. Piskunov M.V., Strizhak P.A., Shcherbinina A.A. Intensive evaporation and boiling of a heterogeneous liquid droplet with an explosive disintegration in high-temperature gas area // Thermal Science. 2016. V. 20. No. 2. P. 541–553.
9. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. Москва: Энероатомиздат, 1991.
10. *Теплотехнический справочник* / Под ред. Юренева В. Н., Лебедева П. Д., Москва: Энергия, 1975. Т. 1.
11. *Теплотехнический справочник* / Под ред. Юренева В. Н., Лебедева П. Д., Москва: Энергия, 1975. Т. 2.

Борисова Анастасия Геннадьевна,
студент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; e-mail: 1nastyia.borisova@gmail.com; тел. +79618902304

Высокоморная Ольга Валерьевна,
к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; e-mail: vysokomornaja@tpu.ru; тел. +79138461236

Пискунов Максим Владимирович,
инженер кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; e-mail: piskunovmv@tpu.ru; тел. +79528979747