УДК 532.529:536.24

СКОРОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ПАРОВЫХ ЗАРОДЫШЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Анисимов М.П.[2,3], Бердюгина И.С.[2], Терехов В.И.[1,2], Шишкин Н.Е.[1]

[1]Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН
[2]Новосибирский государственный технический университет
[3]Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН
Новосибирск, Россия

Работа выполнена в рамках Программы ОЭММПУ РАН (проект 2.10.2)
и интеграционного проекта СО РАН и НАН РБ (проект 26)
Проект РФФИ 14-08-31063 мол_а.

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований динамики центров вскипания на поверхности капли воды, обдуваемой потоком сухого воздуха. Предложена упрощенная модель интенсификации убывания массы капли в результате спонтанной генерации паровых зародышей в поверхностном слое жидкости. В опытах одиночные капли воды с начальным диаметром ~ 2 мм обдувались сухим воздухом со скоростью 2 – 5 м/с. Измерения распределений температуры поверхностей капель были проведены с помощью тепловизора Thermo Tracer TH7102MV, который позволял также регистрировать изменение размеров капель и динамику числа центров кипения от времени.

Схема измерений может найти применение для количественных измерений скоростей (частот) генерации зародышей пара в поверхностном слое капли, обдуваемой потоком сухого газа.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее было показано [1,2], что при испарении капель различных жидкостей температура на поверхности неравномерна. Авторы данной работы не нашли в литературе модели образования неоднородностей температуры на поверхности капли. Из качественного рассмотрения понятно, что неоднородность температуры вызвана случайно возникающими центрами вскипания во внешнем слое капли. Была рассмотрена возможность эмпирического определения скоростей возникновения паровых зародышей в подвешенной капле воды. Инструментальные наблюдения показали, что при достижении достаточной степени метастабильности на поверхности капли начинается спонтанное появление центров кипения. Центры кипения вызывают локальное охлаждение капли. Число таких мест и динамика от времени регистрировались с помощью тепловизора Thermo Tracer TH7102MV. В экспериментах отмечался переход к стационарному процессу на одной капле, когда за время экспозиции наблюдалось примерно одно количество центров, попадающих в единицу времени в поле зрения оптической системы мониторинга. Эмпирически оценены скорости зародышеобразования в растянутой (перегретой) жидкости.

ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В опытах исследовалось испарение капель диаметром ~ 2 мм, которые подвешивались в центре воздушной струи, вытекающей из канала диаметром 52 мм. Воздух низкой влажности (менее 2 %) обдувал каплю с относительной скоростью 0 ÷ 5 м/с, а его температура изменялась в диапазоне 20 - 180 ^{0}C. Направление воздушного потока в опытах было снизу вверх, чтобы исключить срыв капли, подвешенной на конце термопары либо на кончике асбестовой нити, набегающим потоком воздуха.

Основные элементы установки схематически показаны на рис. 1. Здесь цифрами обозначено следующее: 1 – термопара, 2 - подвешиваемая капля жидкости, 3 – тепловизор с микронасадкой, 4 – блок оцифровки и сбора сигналов термопары, 5 – персональный компьютер.

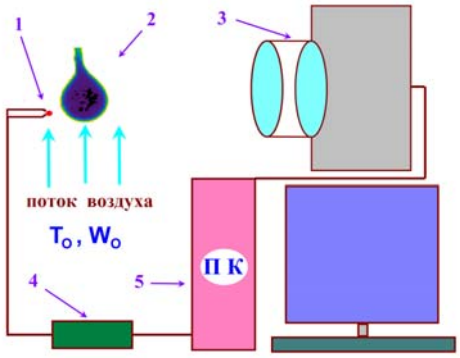
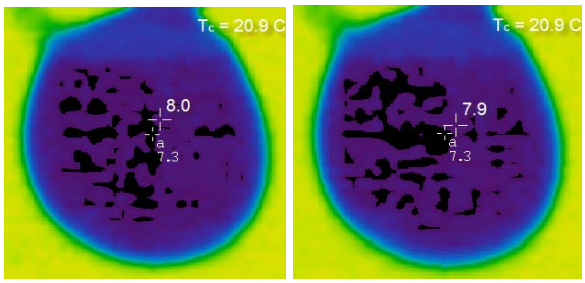


Рис. 1 Система наблюдения за испарением капель

С помощью термографии были проведены серии измерений распределениия температуры на поверхности испаряющейся капли воды. Погрешность измерения не превышала 0,2°С. Оцифровка видеоизображения объекта позволяла количественно определять размер капли и расчитывать изменение её геометрических параметров от времени. Последнее позволяло оценивать интегральные характеристики интен-сивности испарения жидкости на межфазовой границе, а также коэффициенты тепломассообмена на этой границе. Более подробно процедура проведения экспериментов и обработки результатов изложена в работе [1].

ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Типичный вид капель, получаемый в опытах с помощью тепловизора, представлен на термографических снимках, приведенных на рис. 2. Как правило, температура поверхности капель была неравномерна. Образование температурных пятен носит спонтанный характер. На рис. 2 показаны изображения капли, которые получены с интервалом 5 секунд. На рисунках видно, что на достаточно близких расстояниях существуют значительные скачки температуры: на снимках около крестиков показаны локальные значения температуры на поверхности капель.



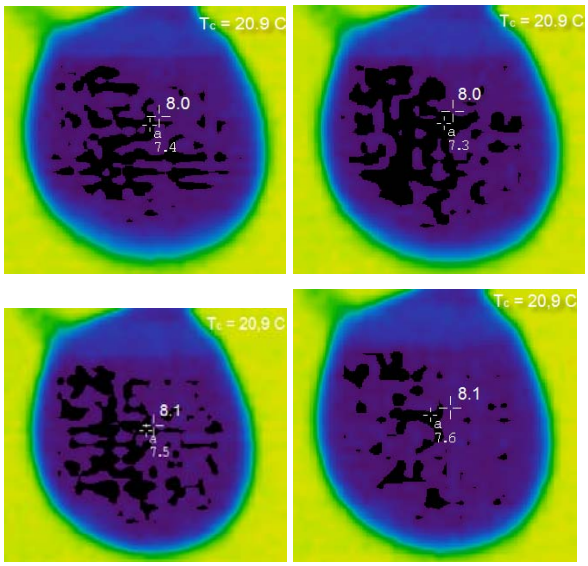


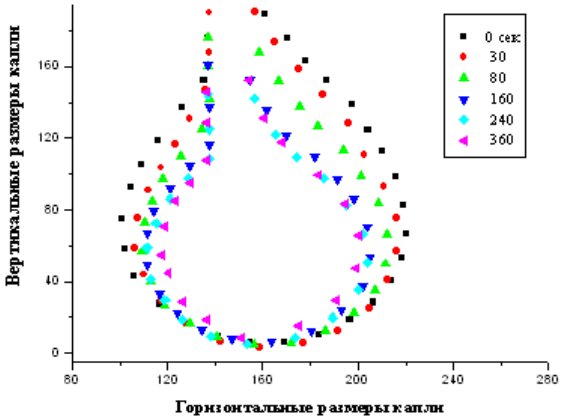
Рис. 2 Вид капли воды в различные моменты времени с интервалом 5 секунд.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ

Результаты термографических микросъемок позволяют делать суждения о форме капель. В приближении сферической капли значение радиуса объекта определялось как $R_i = abs\left|X_i - X_{cp}\right|$, здесь X_{cp} – средняя для капли величина между минимальными и максимальными расстояниями на контуре капли, X_{min} и X_{max}. Типичное изображение капли, как функции от радиуса R(Y), представлено на рис. 3. Функция R(Y) аппроксимировалась полиномом 4-й степени, который далее использовался для определения объема, площади ее поверхности и эффективного диаметра в приближении шаровой формы капли. Погрешность изменения линейного размера капли не превышала 0.1 мм. Для чистых жидкостей данная методика позволяла определить величину массового потока пара с поверхности капли.

Изменение диаметров капель d в потоке сухого воздуха от времени t показано на рис. 4 при разных скоростях струи воздуха. Эксперименты проводились неоднократно, чтобы достигнуть надежности в результатах исследований. Эта пов-торность измерений отражена на рис. 4 и 5 в виде двух столбцов в обозначениях. Начальные размеры капель в серии опытов отличались между собой. На рисунке видно нелинейное снижение диаметра со временем. Линеаризация становится возможной при использовании сте-

пенной зависимости диаметра, $d^{1.5}$, как это было сделано в работах [1, 2].



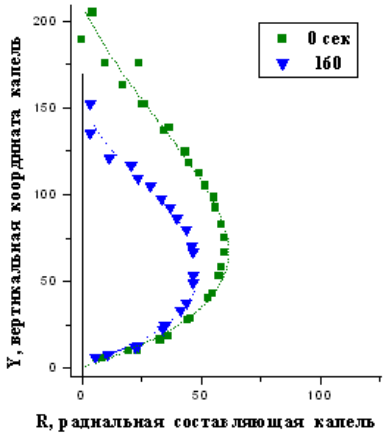


Рис. 3 Вид капли, испаряющейся на кончике асбестовой нити.

Унос жидкости, *j*, с поверхности раздела фаз рассчитывался по величине уменьшения объема капли, *dV/dt*, площади её поверхности, *S*, и ρ – плотность жидкости в капле.

$$j = \rho S^{-1} dV / dt$$

Оценки интенсивности испарения представленные на рис. 5, отражают явную зависимость от начального диаметра капли. Чем больше начальный размер капли, тем медленнее происходит испаре-ние с поверхности. Скорость обтекания воздушной струи менее 2 м/с, в условиях наших экспериментов, оказывала слабое влияние на интенсивность уноса паров воды с поверхности капли.

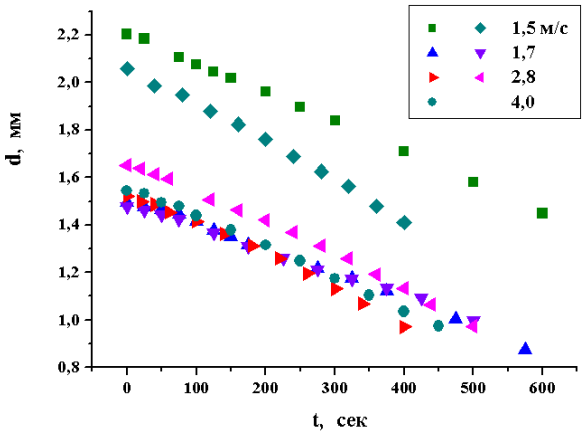


Рис. 4 Изменение диаметра испаряющихся капель воды. Температура струи воздуха $T_c \sim 23{,}6\ ^oC$.

Увеличение скорости обдува приводила к интенсификации процессов массообмена на межфазной границе. Как видно из рис. 5, попереч-ный поток пара на испаряющейся поверхности для большинства режимных параметров возрастает по времени.

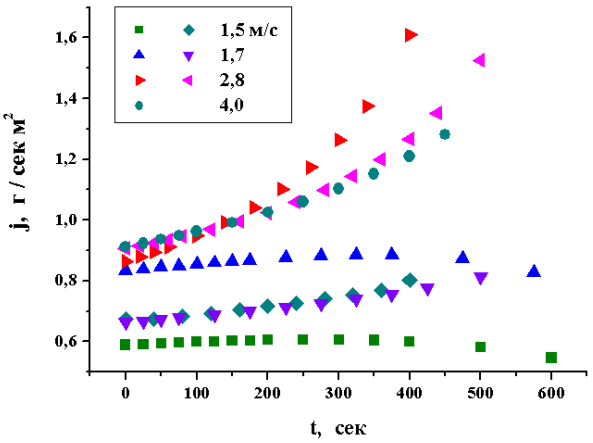


Рис. 5 Интенсивность уноса массы воды с единицы поверхности капли. Обозначения опытов на рис. 4 и рис. 5 идентичны.

СКОРОСТЬ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ ЦЕНТРОВ ВСКИПАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КАПЕЛЬ

Термографическая методика не позволяла регистрировать моменты вскипания, поэтому количество центров вскипания определялось по числу областей, имеющих наиболее низкую температуру на тепловизионном изображении капли. Понижение могло достигать нескольких градусов по отношению к средней температуре капли. Нормировка количества центров вскипания на время наблюдения (время экспозиции

кадра), на объем слоя вскипания и фактор формы (отношение площади поверхности шара к площади наблюдения) позволяла получить число зародышей пара, возникающих за единицу времени в единичном объеме верхнего слоя водяной капли.

Интуитивно представляется, что наибольшие градиенты температуры (и количество центров вскипания) возникают в верхнем слое капли. Более глубокие слои капли играют роль термостата, сглаживая температурные неоднородности в верхнем слое капли. Однако специальных оценок радиальных градиентов температуры на данном этапе не проводилось. Распределение центров кипения по поверхности капли принималось однородным. За нуклеирующий объем принимался внешний слой капли, в котором наблюдались акты вскипания, достаточно хорошо определяемые тепловизором. Для расчета скорости нуклеации использовалась формула: $J = N \cdot k / \tau \cdot V$; где J – скорость нуклеации (Число событий, т.е. центров вскипания в единичном объеме, см^3, за единичное время, 1 сек).

Среднее число событий вскипания (N) получаем осреднением точек с пониженной температурой по нескольким кадрам тепловизора, т.е. суммарное число точек по n кадрам, деленное на n. (при одном и том же поля зрения тепловизора на всех кадрах). Среднее число вскипаний определялось на выделенном участке кадра, который экспонировался в интервале времени τ. В нашем случае принималось, что τ = 0,25 сек. k – фактор формы, позволяющий оценить число центров вскипания в расчете на всей шаровой поверхности. Выбранный участок поверхности на кадре меньше поверхности шара, поэтому фактор формы больше единицы. τ – время экспозиции для кадра. V – объем метастабильного слоя на капле, т.е. слоя вскипания. Он равен площади поверхности шара, умноженной на толщину слоя вскипания (мы приняли толщину метастабильного слоя жидкости, равной двум пикселям на тепловизионном изображении). Результаты измерений скоростей зародышеобразования при вскипании жидкости на поверхности капли приведены на рис. 6.

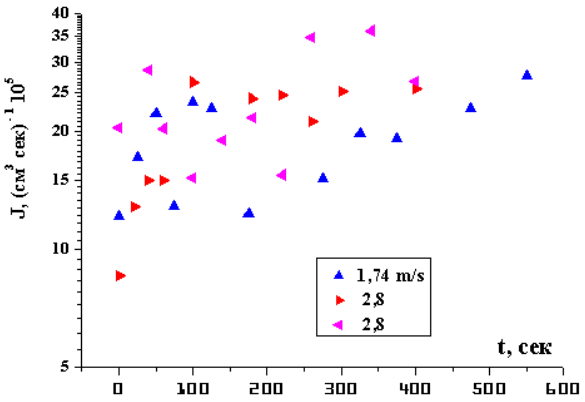


Рис. 6 Скорость образования центров кипения на поверхности капель. Обозначения опытов на графике совпадают с принятыми на рис. 4 и 5.

Значительный разброс значений скоростей зародышеобразования подтверждает гипотезу о случайном возникновении и рапределении центров вскипания по поверхности капель. В последующих постановках необходимо предусмотреть набор увеличения статистики эмпирических значений.

Из серии предварительных измерений была найдены средние скорости зародышеобразования на поверхностях капель с погрешностью 10% для скорости обдувающего потока 1.74 м/с и температуры обдувающего потока 23.8 ^{o}C, соответственно, равные: $7.3 \cdot 10^5$ см$^{-3}$с$^{-1}$ в одной серии измерений и $18.9 \cdot 10^5$ см$^{-3}$с$^{-1}$ для капель диаметром 2.20 и 1.50 мм, соответственно. Температура нуклеации составила 9.6 ^{o}C в первой и 10.1 ^{o}C во второй серии измерений. Получено качественное совпадение с данными, опубликованными в работе [3].

ВЫВОДЫ

В данной работе впервые предложена и реализована схема измерения скоростей зародышеобразования в капле обдуваемой сухим газом. Эмпирически определены скорости зародышеобразования (кавитации) газовых пузырьков в капле. Однако сравнивать результаты измерений скоростей нуклеации, выполненных различными методами еще недостаточно корректно, поскольку на наш взгляд необходимо выполнить подробное моделирование тепломассобмена в капле, помещенной с поток сухого газа и доопределить температуру нуклеации при вскипании поверхностного слоя капли.

В настоящее время известно, что измерения скоростей зародышеобразования с использованием различных измерительных схем различаются на несколько порядков. Например, данные по скоростям зародышеобразования в пересыщенном паре, полученные в поточной диффузионной камере, отличаются на 3-4 порядка от результатов статической диффузионной камеры [4] и от данных двухпоршневой камеры адиабатического расширения [5]. Однако, мы считаем, что предложенная нами схема впервые позволяет количественно определять скорости зародышеобразования в верхнем слое капли, обдуваемой сухим газом.

Развитие приведенной выше схемы измерений позволит создать новый метод для количественного измерения скоростей нуклеации при вскипании жидкости на поверхности капель, находящихся в атмосфере высушенного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // Инж. физ. журн. – 2010. – №5. – С. 829-836.

   Terekhov V.I., Terekhov V.V., Shishkin N.E., Bi K.Ch. Eksperimentalnoe i chislennoe issledovaniya nestatsionarnogo ispareniya kapel zhidkosti // Inzh. fiz. zhurn. – 2010. – №5. – S. 829-836.

2. Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Испарение капель воды с углеродными нанотрубками // Письма в ЖТФ, 2012, том 38, вып.1. С. 51-57.

   Terekhov V.I., Shishkin N.E. Isparenie kapel vody s uglerodnymi nanotrubkami // Pisma v ZhTF, 2012, tom 38, vyp.1. S. 51-57.

3. Скрипов В.П., Синицын Е.Н. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. – 1980. Атомиздат, Москва. С. 209.

   Skripov V.P., Sinitsyn E.N. Teplofizicheskie svoystva zhidkostey v metastabilnom sostoyanii. – 1980. Atomizdat, Moskva. S. 209.

4. Brus, D., Hyvarinen, A.. Zdimal, V. and Lihavainen H. Homogeneous nucleation rate measurements of 1-butanol in helium: A comparative study of a thermal cloud chamber and a laminar flow diffusion chamber // J. Chem. Phys. – 2005. –V. 122, – P. 214506.

5. Anisimov, M.P., Hameri, K., Kulmala, M. Construction and test of laminar flow diffusion chamber: Homogeneous nucleation of DBP and n-Hexanol // J. Aerosol Sci., – 1994. –V. 25(1). – P. 23-32