

УДК 532.32

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЬ-ПАР ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ ФРЕОНА-113 НА ПОВЕРХНОСТИ СФЕРЫ

Агальцов А.М.¹, Походалова А.Б.^{1,2}, Шмельков Ю.Б.^{1,2,3}

¹*Объединённый Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия*

²*Московский Энергетический Институт (Технический Университет), Москва, Россия*

³*ОАО «ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского», Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование плёночного кипения насыщенного фреона-113 на сферах с различными диаметрами при атмосферном давлении в условиях свободной конвекции. При помощи высокоскоростной видеосъёмки обна-

ружены несинусоидальные волновые образования на границе раздела жидкость-пар. Определена зависимость осредненной толщины паровой пленки от температурного напора.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение колебаний границы раздела фаз при плёночном кипении представляет интересную и важную научную задачу. Ее решение может помочь разработать адекватную физическую модель процесса и глубже понять природу кризиса плёночного кипения и парового взрыва. Большинство существующих на данный момент теоретических моделей, описывающих плёночное кипение на сфере [1-4], строятся на предположениях о гладкости границы раздела жидкость-пар и независимости толщины паровой плёнки от времени. Однако, как показал анализ видеосъёмки процесса, это не всегда соответствует действительности, т.к. на границе раздела фаз отчетливо видны несинусоидальные трехмерные волновые образования с амплитудой, превосходящей среднюю толщину паровой плёнки, вид которых подобен волнам при стекании тонких пленок жидкости с наклонной и вертикальной поверхностей [5].

Несмотря на существенное влияние неровности границы раздела фаз на локальную и интегральную теплоотдачу [6], а также на мгновенное и осредненное по времени распределение температуры в сферическом нагревателе данный вопрос мало изучен.

Необходимо отметить, что в последнее время для анализа процесса плёночного кипения успешно применяется численное моделирование на основе Volume of fluid (VOF) метода [7-10]. Несомненно, сравнение полученных в ходе численного решения временных и температурных зависимостей толщины паровой пленки с полученными экспериментальными данными поможет скорректировать методику и более адекватно применять допущения, сделанные в ходе построения модельных уравнений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.1. Емкость с исследуемой жидкостью (1) представляла собой горизонтально расположенный цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 90 мм, снабженный двумя смотровыми окнами для проведения визуальных наблюдений и видеофотосъёмки, на внешнюю стенку которого был намотан электрический нагреватель для установления необходимой в конкретном опыте температуры жидкости. К верхней части сосуда крепился вертикальный конденсатор (2) типа труба в трубе, при этом в качестве охлаждающей жидкости использо-

валась водопроводная вода. Над конденсатором была установлена камера для нагрева образца (3). Сфера (4), жёстко закреплённая на специальном трубчатом зонде, с его помощью поднималась в зону нагрева, а затем погружалась в жидкость при синхронном включении системы сбора данных с датчиков температуры.

Для измерения температуры сферы использовалась хромель-алюмелевая термопара с диаметром термоэлектродов 0.2 мм, сделанная с помощью теплостойкого клея ВС-10Г в глухое отверстие диаметром 0.8 мм и глубиной 15 мм, просверленное под углом 45° к вертикальной оси. Для измере-

ния температуры жидкости в объеме емкости и нагревательного устройства также использовались хромель-алюмелевые термопары. Сигналы термопар подавались на 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь E24 фирмы L-Card, работающий на частоте 20 Гц, и подключенный к персональному компьютеру с установленной специальной программой.

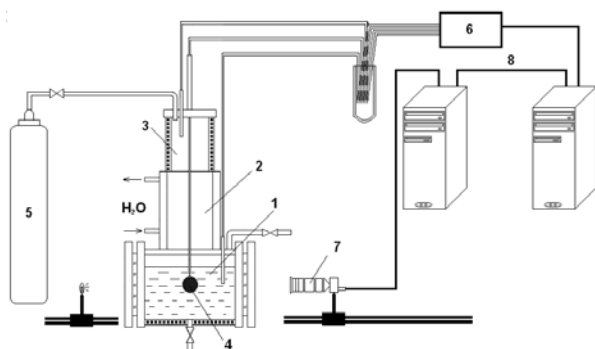


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – емкость с исследуемой жидкостью, 2 – конденсатор, 3 – камера для нагрева образца, 4 – сфера, 5 – баллон с аргоном, 6 – АЦП, 7 – высокоскоростная видеокамера, 8 – линия синхронизации.

Также проводилась скоростная видеосъемка с помощью 8-ми битной (256 оттенков серого цвета)

РЕЗУЛЬТАТЫ

При визуальном исследовании поведения границы раздела жидкость-пар при кипении насыщенного фреона-113 в районе экватора медной сферы диаметром 30 мм и алюминиевой сферы диаметром 25 мм были обнаружены волновые образования, имеющие амплитуду, соизмеримую или даже превосходящую осредненную толщину паровой пленки. Видеокадры, иллюстрирующие различные виды волн, а также другие характерные явления на границе раздела жидкость-пар, приведены на рис.2.

На рис.2а представлен характерный вид волнового образования, имеющего пологую переднюю часть и круто обрывающийся в большинстве случаев неровный задний фронт, который под действием сил трения на границе раздела жидкость-пар и реактивных сил со стороны жидкости может «заваливаться» в сторону противоположную направлению движения. Возникновение волн такой геометрии имеет наибольшую вероятность. Осредненная частота волн при кипении на медной сфере диаметром 30 мм равна примерно 60 - 65 Гц, а амплитуда достигает 2 мм. Скорость движения волн, определен-

монохромной высокоскоростной видеокамеры МОСАМ-4000 фирмы Mikrotrop со следующими параметрами: разрешение 120×100 пикселей, частота 3496 Гц, экспозиция 1/70000 секунды. Во время проведения эксперимента при достижении показания термопары в центре сферы требуемого значения на камеру подавался синхронизирующий сигнал, включающий запись видеокадров в память ЭВМ.

Для определения координаты поверхности сферы использовалась методика, построенная на нахождении минимальной (считая слева направо) координаты паровой пленки в реализации. В работе [6] по изучению колебаний границы раздела фаз жидкость-пар в районе нижней образующей горизонтальной трубки диаметром 2 мм при кипении фреона-113 обнаружено, что минимальная толщина паровой пленки может достигать значений меньших чем 0.018 мм (линейный размер пикселя). Исходя из этого факта, а также из относительной длительности съемки с точки зрения статистики колебаний паровой пленки, можно сделать вывод о достоверности данной методики.

Использование данной методики помогает избежать погрешностей, связанных с нахождением координаты поверхности посредством съемки сферы по завершении процесса после кипения, т.е. после эксперимента, т.к. во время реализации сферы и трубчатый зонд, к которому она крепится, претерпевают тепловые расширения/сжатия (перемещение поверхности сферы достигает 0.25 мм).

ная по заднему фронту, лежит в диапазоне от 0.4 до 0.8 м/с.

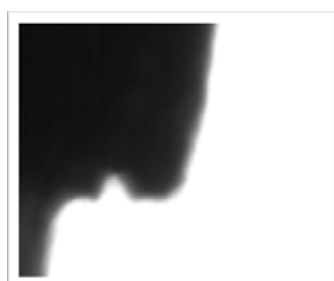
Следует отметить, что геометрия волн может сильно варьироваться, например, обнаружены волны небольших амплитуд (в подавляющем большинстве случаев данный факт имеет место при амплитудах меньше чем 0.6 мм) с также пологой задней частью.

От гребня волны и от точки локального минимума после ее прохождения возможен отрыв паровых пузырей (рис.2б), диаметр которых лежит в диапазоне 0.1 – 0.5 мм, также возможно слияние ранее образовавшихся пузырей с паровой пленкой.

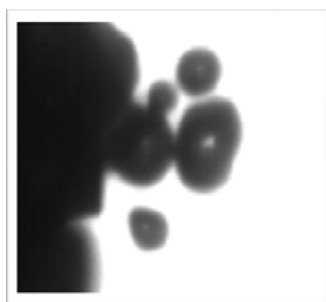
Кроме того, наблюдалось образование паровых «отростков», которые могли эволюционировать с последующим отрывом пузыря или сглаживаться за счет действия сил поверхностного натяжения.

На рис.3 изображена зависимость осредненной толщины паровой пленки в районе экватора в диапазоне температурных напоров 100 – 150 К. Линиями обозначены интервалы температур, при которых производилось осреднение конкретной временной реализации, длившейся примерно 5 секунд.

Видно, что для медной сферы диаметром 30 мм при $\Delta T = 98.5$ К осредненная толщина паровой пленки равна примерно 0.43 мм, а при $\Delta T = 148.5$ К примерно 0.57 мм, т.е. увеличение температурного напора на 50 К привело к увеличению осредненной толщины паровой пленки на 0.14 мм.



а)



б)

Рис.2 Выборочные характерные кадры высокоскоростной видеосъемки в районе экватора сферы. Размер изображения 2.16×1.80 мм; белой линией слева обозначена граница сферы.

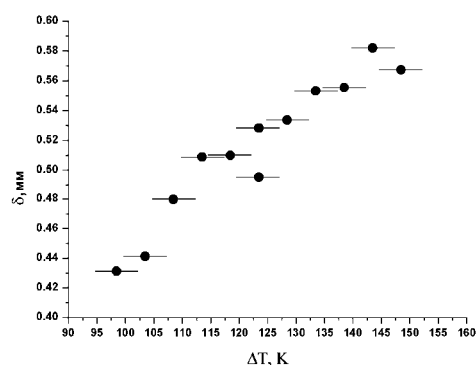
ВЫВОДЫ

Разработана методика исследования границы раздела фаз жидкость-пар при пленочном кипении при помощи высокоскоростной видеосъемки, которая позволяет определять мгновенную толщину паровой пленки и определять другие характеристики процесса.

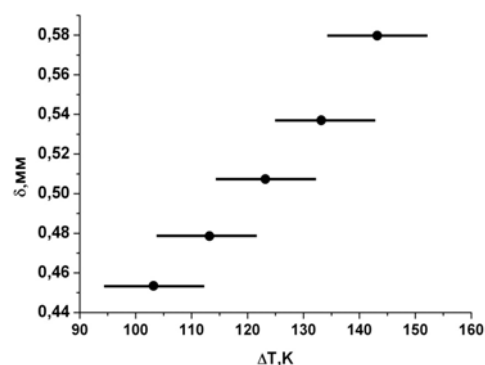
При исследовании паровой пленки в районе экватора обнаружены волновые образования, осредненная частота которых для медной сферы диаметром 30 мм равна примерно 60 - 65 Гц, а амплитуда

ЛИТЕРАТУРА

1. Frederking T.H.K., Clark J.A. Natural Connection Film Boiling on a Sphere // Advances in Cryogenic Engineering. V. 8. 1963. P. 501-506.
2. Hencricks R.C., K.J. Baumeister // NASA Technical Note TND-5124, June 1969
3. Dhir V.K., et al Subcooled Film-Boiling heat



а)



б)

Рис.3 Зависимость осредненной толщины паровой пленки в районе экватора сферы от температурного напора: а) медная сфера $d = 30$ мм; б) алюминиевая сфера $d = 25$ мм.

достигает 2 мм. Скорость движения волн, определенная по заднему фронту, лежит в диапазоне от 0.4 до 0.8 м/с.

Также получены зависимости осредненной толщины паровой пленки от температурного напора в диапазоне 100 – 150 К. Обнаружено, что увеличение температурного напора на 50 К привело к увеличению осредненной толщины паровой пленки на 0.14 мм.

transfer from spheres // Nuclear Engineering and Design 47 (1978) 49-66

4. Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1995. 400 с.
5. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р.

- Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
6. Кузма-Кичта Ю.А. Исследования влияния малотеплопроводных покрытий на теплоотдачу при плёночном кипении. Дис. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1973. 155 с.
 7. Son G., Dhir V.K. A level set method for analysis of film boiling on an immersed solid surface // Numerical Heat Transfer. 2007. V. 52. № 2. P. 153-177.
 8. Son G., Dhir V.K. Three-dimensional simulation of saturated film boiling on a horizontal cylinder // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 1156-1167.
 9. Yuan M.H., Yang Y.H., Li T.S., Hu Z.H. Numerical simulation of film boiling on a sphere with a volume of fluid interface tracking method // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2008. V. 51 P. 1646-1657.
 10. Meduri P.K., Warriar G.R., Dhir V.K. Wall heat flux partitioning during subcooled forced flow film boiling of water on a vertical surface // Int J. of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 3534-3546.