УДК 532.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЖИМА ВОЛНОВОГО ТЕЧЕНИЯ ПАРА ОТ ДИАМЕТРА И СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ НА СФЕРЕ

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 «ЭНИН им.Г.М.Кржижановского», Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование плёночного кипения насыщенного фреона-113, воды и н-гексана на сферах с различными диаметрами при атмосферном давлении в условиях свободной конвекции. При помощи высокоскоростной видеосъёмки обнаружены развитые трехмерные и двумерные (кольцевые) волновые образования на границе раздела жидкость-пар. Сделано предположение о зависимости характера течения пара от числа Архимеда.

ВВЕДЕНИЕ

Применение двухфазных потоков является на сегодняшний день одним из самых эффективных способов отведения тепла. С точки зрения инженерных задач из-за высокого коэффициента теплоотдачи наиболее предпочтителен режим пузырькового кипения. Однако во избежание тяжелых последствий аварийных ситуаций при эксплуатации теплообменного оборудования, а также для более глубокого понимания критических явлений представляется важным исследование закризисных явлений, таких как пленочный режим кипения.

С точки зрения технической реализации исследований пленочного кипения использование сферической геометрии поверхности нагрева является наиболее удобным, т.к. в отличие от кипения на вертикальном цилиндре и вертикальной плоскости влияние концевых эффектов мало.

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. Но как показал анализ видеосъемки 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].

Необходимо отметить, что в последнее время для анализа процесса пленочного кипения успешно применяется численное моделирование на основе Volume of fluid (VOF) метода [6-9]. 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.

Несмотря на существенное влияние неровности границы раздела фаз на локальную и интегральную теплоотдачу, а также на мгновенное и осредненное по времени распределение температуры в нагревателе данный вопрос мало изучен. Исключение составляет работа [10], в которой исследовались колебания границы раздела фаз при пленочном кипении дистиллированной воды на нижней образующей сферы из нержавеющей стали диаметром 12,5 мм и платиновой проволоки диаметром 0,3 мм. К сожалению, в данной работе для сферы приведено лишь характерное изменение толщины паровой пленки во времени, из чего сложно судить как о качественном поведении, так и о статистических характеристиках процесса. Также в работе [11] исследовалось поведение паровой пленки на нижней образующей горизонтальной трубки диаметром 2 мм при пленочном кипении фреона-113, экспериментально определены интегральные функции плотности вероятности толщины паровой пленки и влияние на процесс кипения нанесения малотеплопроводного покрытия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

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 видеосъемки, на внешнюю стенку которого был намотан электрический нагреватель для установления необходимой в конкретном опыте температуры жидкости.

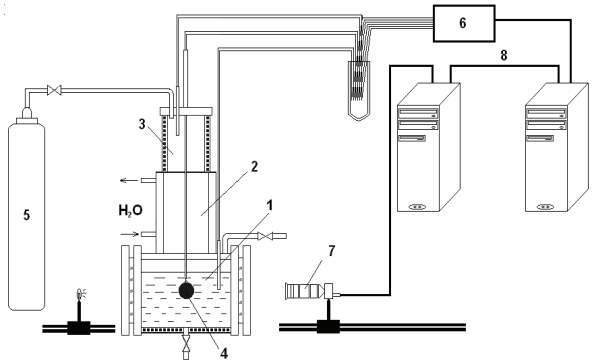

Рис.1 Схема экспериментальной установки. 1 – емкость с исследуемой жидкостью, 2 – конденсатор, 3 – камера для нагрева образца, 4 – сфера, 5 – баллон с аргоном, 6 – АЦП, 7 – высокоскоростная видеокамера , 8 – линия синхронизации.

К верхней части сосуда крепился вертикальный конденсатор (2) типа труба в трубе, при этом в качестве охлаждающей жидкости использовалась 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, заделанная с помощью теплостойкого клея ВС-10Т в глухое отверстие диаметром 0.8 мм и глубиной 15 мм, просверленное под углом 45° к вертикальной оси. Для измерения температуры жидкости в объеме емкости и нагревательного устройства также использовались хромель-алюмелевые термопары. Сигналы термопар подавались на 24-разрядный аналогово-цифровой преобразователь E24 фирмы L-Card, работающий на частоте 20 Гц, и подключенный к персональному компьютеру с установленной специальной программой.

Также проводилась скоростная видеосъемка с помощью 8-ми битной (256 оттенков серого цвета) монохромной высокоскоростной видеокамеры MOCAM-4000 фирмы Mikrotron. Во время проведения эксперимента при достижении показания термопары в центре сферы требуемого значения на камеру подавался синхронизирующий сигнал, включающий запись видеокадров в память ЭВМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При визуальном исследовании поведения границы раздела жидкость-пар при пленочном кипении насыщенного фреона-113, воды и н-гексана на поверхности сферы при помощи высокоскоростной видеокамеры были обнаружены трехмерные волновые образования, имеющие амплитуду соизмеримую или даже превосходящую осредненную толщину паровой пленки.

Следуя выводам, сделанным в [4], критерием возникновения волн на паровой пленке, а также смене режимов волнового течения является число Архимеда $Ar_d = \frac{gD^3}{\nu_v^2}\left(\frac{\rho_f - \rho_v}{\rho_f}\right)$, где g - ускорение свободного падения, D – диаметр сферы, ρ_f и ρ_v – плотности жидкости и пара соответственно, ν_v – кинематическая вязкость пара.

На рис.2 представлены характерные видеокадры процесса. Два верхних видеокадра иллюстрируют поведение паровой пленки при кипении н-гексана на медной сфере диаметром 30 мм при температурном напоре равном примерно 190 К ($Ar_d = 34{,}7 \cdot 10^8$). Видно, что волны могут иметь как приближенно двумерную (кольцевую), так и ярко выраженную трехмерную структуру. Следует отметить, что трехмерные волновые структуры на паровой пленке, в виде бегущих по направлению к верхней части сферы «паровых пузырей», статистически более реализуемы.

Видеокадр находящийся снизу и слева иллюстрирует характерный вид волнового образования при пленочном кипении фреона-113 на медной сфере диаметром 30 мм ($Ar_d = 21{,}7 \cdot 10^8$). В этом случае также наиболее вероятны трехмерные волновые структуры. Однако распад кольцевых структур происходит при больших углах и в отличие от кипения н-гексана на сфере диаметром 30 мм во многих случаях заметна псевдодвумерность.

Видеокадр находящийся снизу и справа иллюстрирует характерный вид волнового образования при пленочном кипении фреона-113 на медной сфере диаметром 20 мм ($Ar_d = 6{,}4 \cdot 10^8$). В этом случае кольцевая структура волн сохраняется в большинстве случаев до верхней части сферы.

Таким образом, можно отметить, что при

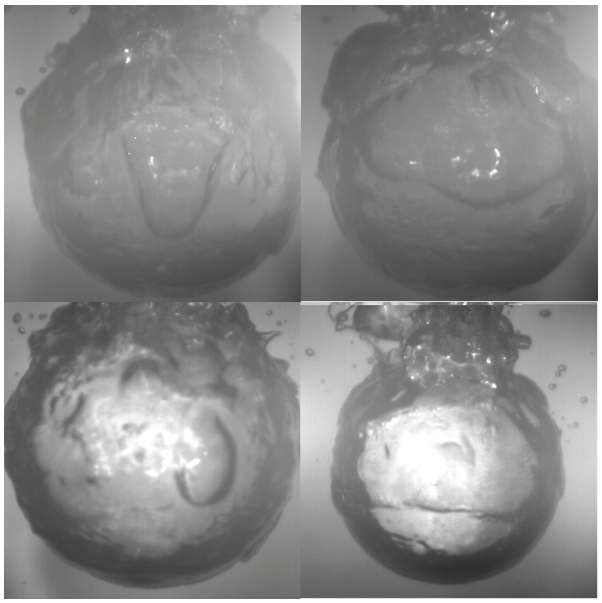

Рис.2 Характерные видеокадры пленочного кипения на сфере

уменьшении числа Архимеда, выбранного нами в качестве критерия, происходит уменьшение трехмерности волн на паровой пленке. А при переходе через критическое значение, лежащее в диапазоне от $6{,}4 \cdot 10^8$ до $21{,}7 \cdot 10^8$, структура волн меняется от развитого трехмерного режима к кольцевому режиму течения. Также вероятно, при числах Архимеда меньше некоторого второго критического значения меньшего, чем $6{,}4 \cdot 10^8$ происходит переход от волнового течения к гладкому.

Также были проведены опыты по кипению дистиллированной воды на сферах с диаметрами 20 ($Ar_d = 41 \cdot 10^8$) и 30 мм ($Ar_d = 140 \cdot 10^8$). В обоих случаях движение границы раздела фаз жидкость-пар имело слабо упорядоченный характер. Наблюдавшиеся волновые образования имели развитую трехмерность.

Неупорядоченность движения волн на поверхности раздела фаз можно объяснить не только большим числом Архимеда, но и наличием локальных контактов жидкости с поверхностью нагрева, которые имели место даже при

Рис.3 Характерные вид заднего фронта волны при пленочном кипении на сфере в районе экватора

температурных напорах превышающих 300 К.

На рис.3 показан характерный вид описанных выше волн в районе экватора сферы. Видно, что волны имеют круто обрывающийся в большинстве случаев неровный задний фронт, что говорит о существенной нелинейности процесса взаимодействия паровой пленки с окружающей ее жидкостью. Данный факт серьезно затрудняет анализ устойчивости того или иного режима течения пара, а следовательно на данном этапе проблематично представить какие-либо теоретические оценки значений критических чисел Архимеда.

ВЫВОДЫ

При визуальном исследовании поведения границы раздела жидкость-пар при пленочном кипении насыщенного фреона-113, воды и н-гексана на поверхности сферы при помощи высокоскоростной видеокамеры были обнаружены трехмерные волновые образования, имеющие амплитуду соизмеримую или даже превосходящую осредненную толщину паровой пленки.

Выделено два реализуемых в эксперименте режима течения пара: с двумерными (кольцевыми) волнами на границе раздела фаз жидкость-пар и трехмерными волнами, которые во многих случаях имеют форму бегущего пузыря.

Отмечена целесообразность использования числа Архимеда как критерия перехода одного режима волнового течения в другой.

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.Эзау К. Анатомия семенных растений. Книга 1. – М.: Мир, 1980. – 218 С.
2. Hencricks R.C., K.J. Baumeister // NASA Technical Note TND-5124, June 1969.
3. Dhir V.K., at al Subcooled Film-Boiling heat 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. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Meduri P.K., Warrier 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.
10. Toda S., Mori M. Subcooled film boiling and the behavior of vapor film on a horizontal wire and a sphere // Proceedings of the Seventh International Heat transfer Conference, Munich, West Germany. 1982. V. 4. P. 173-178.
11. Кузьма-Кичта Ю.А. Исследование влияния малотеплопроводных покрытий на теплоотдачу при плёночном кипении. Дис. канд. техн .наук. М.: МЭИ, 1973. 155 с.