

О НАЧАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО КИПЕНИЯ ВОДЫ

АННОТАЦИЯ

Приведены экспериментальные данные о начале поверхностного кипения в зависимости от давления, степени недогрева до температуры насыщения и скорости потока воды в кольцевом канале. Исследование проводилось при давлениях от 1,47 до 2,94 МПа и линейных скоростях потока от 1,0 до 6,0 м/с. Определен тепловой поток, при котором возникает поверхностное кипение в зависимости от давления в канале.

Экспериментально установлено, что начало поверхностного кипения и переходная область от поверхностного к развитому кипению не зависят от геометрии канала, а в основном определяются термодинамическими параметрами и скоростью потока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные представления о гидродинамике и теплообмене при поверхностном и развитом кипении сложились благодаря детальным исследованиям структуры двухфазного потока в обогреваемых круглых трубах и каналах. Различные методы исследований, основанные на определении истинного объемного паросодержания в двухфазном потоке и полном температурном обследовании поверхности теплообмена и потока жидкости позволили обозначить границы режимов течения двухфазного потока в обогреваемых каналах.

Установление четких границ существования режимов течения достаточно затруднительно из-за того, что смена одного режима течения другим происходит плавно, без резких границ, а устойчивость режимов течения может зависеть от стохастического взаимодействия параметров двухфазного потока и режимных термодинамических параметров.

Большое количество экспериментальных данных дают возможность представить качественный характер распределения основных характеристик двухфазного потока по длине парогенерирующего канала [1–3].

При кипении недогретой жидкости при отрицательных энтальпиях потока образующийся пар концентрируется в пристенном слое. При этом скорость жидкости в ядре потока должна быть больше скорости пароводяной смеси в пристенном кипящем слое, а истинное объемное паросодержание будет больше расходного объемного паросодержания в том же сечении.

Закономерности теплообмена при кипении можно качественно проследить, рассматривая температурный режим теплоотдающей поверхности при постоянной массовой скорости среды, удельном тепловом потоке, давлении и температуре воды на

входе в канал. Детальное описание такого процесса в неравновесном двухфазном потоке представлено в [1].

Различают два вида кипения: развитое кипение – кипение жидкости, нагретой в объеме до температуры насыщения, и поверхностное кипение – когда жидкость догрета до температуры насыщения вблизи поверхности нагрева. Кипение происходит в тонком пограничном слое жидкости, который соприкасается с поверхностью нагрева, и температура его выше температуры кипения при данном давлении. Поверхностное кипение характеризуется возникновением пара на отдельных местах поверхности нагрева, что создаёт неоднородную структуру смеси жидкости и пара у поверхности тепловыделения. Наличие распределённой двухфазной системы у границы тепловыделения с переменными подвижными поверхностями раздела фаз представляет большую трудность для аналитического описания такого процесса.

Процесс поверхностного кипения жидкости изучен недостаточно, а в последнее время теплоэнергетика проявляет к нему большой интерес.

Несмотря на большое количество исследований начала поверхностного кипения, нет надёжных методов определения начала поверхностного кипения

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

2.1. Рабочий участок

В настоящей работе исследовали начало поверхностного кипения в зависимости от давления, степени недогрева до температуры насыщения, скорости потока воды в кольцевом канале, диапазона давлений 1,47–2,94 МПа и линейных скоростей воды 1–6 м/с на циркуляционном стенде, описанном в [4].

Схема рабочего участка приведена на рис. 1. В корпусе колонки с двух сторон по длине рабочего участка установлены окна из плексигласа. Для создания кольцевого канала использовалась трубка из молибденового стекла. Рабочий участок – трубка из стали 10X18H9T с диаметрами 8×1 и 6×0,25 мм длиной 300 мм.

Рабочий участок устанавливался в стеклянной трубке вертикально и вода подводилась снизу вверх. Охлаждение плексигласовых окон осуществлялось водой из холодильника циркуляционного насоса. Кольцевой зазор между рабочим участком и стеклянной трубкой составлял 2 мм.

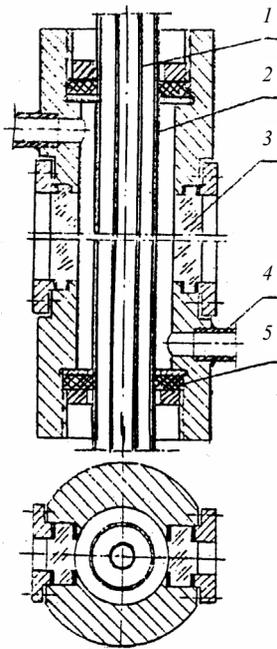


Рис.1. Принципиальная схема рабочего участка: 1 – нагревательная трубка из стали; 2 – трубка из молибденового стекла; 3 – плексигласовые окна; 4 – подвод охлаждающей воды; 5 – прокладки из салоксановой резины

Фиксирование рабочего участка в стеклянной трубке осуществлялось фигурными втулками на медных токоподводах. Обогреваемая трубка припаивалась серебряным припоем к медным токоподводам. Для измерения температуры поверхности нагревательного элемента к внутренней стенке трубы приваривались три хромель-алюмелевые термопары на расстоянии 20, 100 и 200 мм от места пайки верхнего токоподвода.

Пучок света, расположенный с обратной по отношению к наблюдателю стороны нагревательного элемента, направлялся на тепловыделяющую поверхность таким образом, чтобы после преломления в окна он падал на границу поверхности тепловыделения. При стабильном потоке пучок света не был виден наблюдателю. По мере роста нагрузки у тепловыделяющей поверхности образовывалась нестабильность потока, а затем пароводяная эмульсия. При образовании пароводяной эмульсии на границе поверхности пучок света преломлялся в нестабильном потоке в виде точечных вспышек по длине участка, а затем резкость их уменьшалась и совсем пропадала, можно было видеть слой эмульсии, переходящий в развитое кипение. Образование вспышек (хорошо наблюдалось при сильном увеличении) начиналось во впадинах шероховатости поверхности. При увеличении нагрузки рост зоны пароводяной эмульсии увеличивался, переходя в развитое кипение по всему кольцевому зазору. Переход сопровождался в начальной стадии резким звуком, который переходил затем к более глухому. При росте тепловой нагрузки увеличивалась зона развитого кипения по длине участка. Переход к развитому кипению подтверждался показаниями термопар. Такое поведение потока жидкости при переходном

режиме, очевидно, было результатом того, что скорость пароводяной эмульсии больше скорости слоя жидкости. В области развитого кипения температурное поле выравнивалось и прекращалось интенсивное перераспределение скоростей. Частота звука растёт как следствие возросшей скорости потока.

2.2. Обработка опытных данных

Начало поверхностного кипения в кольцевом зазоре определяется комплексом

$$B = \frac{q^{0.7} p^{0.1}}{(w \Delta t_n)^{0.63}} > (1,04 + 1,06) \cdot 10^3 \quad (1)$$

при $\alpha_{\text{кип}} = \alpha_{\text{конв}}$, где q , Вт/м².

На основании экспериментальных данных настоящей работы получена формула для определения теплового потока начала поверхностного кипения в зависимости от давления, линейной скорости и степени недогрева воды, МВт/м²:

$$q_{\text{нк}} = \frac{22,55}{p^{0,265}} K_2 w, \quad (2)$$

где p в МПа – абсолютное давление; $K_2 = \frac{i' - i_{\text{вых}}}{r}$ – относительная энтальпия потока; w – линейная скорость, м/с.

Для обработки опытных данных использовали координаты:

$$\frac{w^{0,40+0,007w^2}}{q^{0,7} p^{0,5}} \text{ от } \Delta t_n. \quad (3)$$

Полученные данные согласуются с [5].

На рис. 2 представлены опытные данные по началу поверхностного кипения при вынужденном движении недогретой воды в кольцевом канале. Разброс опытных данных относительно формулы (3) не превышает $\pm 20\%$. Из графика видно, что область, находящаяся выше линии АВ, соответствует области конвективного теплообмена без поверхностного кипения. Область ниже линии СД соответствует развитому кипению воды. Промежуточная область между линиями АВ и СД соответствует области начала поверхностного кипения и образования пароводяной эмульсии у поверхности теплообмена. Одновременно на рис. 2 представлены опытные данные работ [5,6]. Все данные при недогревах воды до температуры насыщения $\Delta t_n \geq 15$ град, хорошо описываются комплексом

$$\frac{w^{0,40+0,007w^2}}{q^{0,7} p^{0,5}} = A. \quad (4)$$

При недогревах $\Delta t_n \leq 15$ град, различия между поверхностным и развитым кипением почти нет, поэтому в этой области наблюдается некоторый разброс опытных данных.

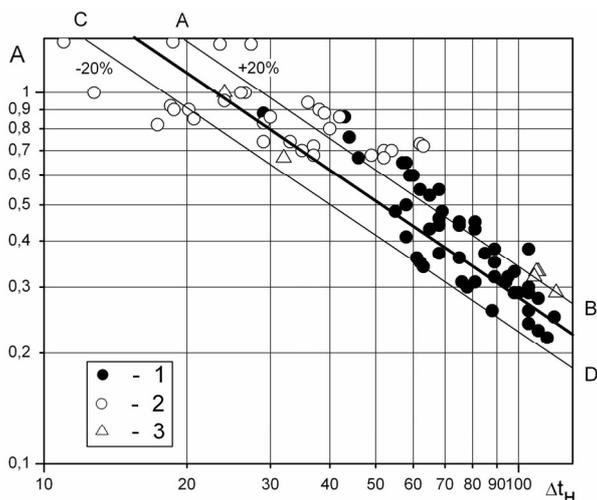


Рис. 2. Опытные данные по началу поверхностного кипения при вынужденном движении недогретой воды в кольцевом канале: 1 – данные настоящей работы; 2 – данные из [6]; 3 – данные из [5]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Начало поверхностного кипения и переходная область от поверхностного к развитому кипению не зависят от геометрии канала, а в основном определяются физическими параметрами и скоростью потока воды.

2. Пользуясь соотношением

$$\frac{w^{0,40+0,007w^2}}{q^{0,7} p^{0,5}} = A,$$

можно оценить процессы, происходящие у границы тепловыделяющей поверхности:

а) при $A \geq 14,0 \Delta t_n^{-0,85}$ поверхностное кипение отсутствует;

б) при $A = (14,0 + 10,9) \Delta t_n^{-0,85}$ начинается поверхностное кипение;

(в обоих случаях расчёты коэффициента теплоотдачи могут проводиться по известным формулам, где $\alpha = \alpha_{\text{конв}}$)

в) при $A \leq 10,9 \Delta t_n^{-0,85}$ происходит формирование пароводяной эмульсии и наступает развитое кипение. В этом случае расчёты коэффициента теплоотдачи проводятся по известным формулам, где $\alpha = \alpha_{\text{кип}}$.

За точку начала поверхностного кипения может быть принята точка пересечения двух линий, соответствующих температуре теплоотдающей стенки: одна – для области развитого кипения, а вторая – для области конвективного теплообмена однофазной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Невструева Е.И.** Гидродинамические и теплообменные характеристики двухфазных неравновесных потоков в парогенерирующих каналах // Достижения в области исследования теплообмена и гидравлики двухфазных потоков в элементах энергооборудования: Сб/. Под ред. В.М. Боришанского. Л.: Наука, 1973. С. 66–79.
2. **Теплообмен** в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев: учебн. пособие для вузов. – 3-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2003. С. 558.
3. **Похвалов Ю.Е., Кронин И.В., Курганов А.А.** Обобщение данных по теплоотдаче при кипении недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 1966. №5. С.63–67.
4. **Зенкевич Б.А., Субботин В.И.** Критические тепловые нагрузки при вынужденном движении воды, недогретой до кипения // Атомная энергия. 1957. Т. 3. № 8. С. 361–364.
5. **Полетавкин П.Г., Шапкин Н.А.** Теплоотдача при поверхностном кипении воды // Теплоэнергетика. 1958. №5. С. 72–76.
6. **Рассохин Н.Г., Ма Цан-Вень, Мельников В.Н.** Теплоотдача при поверхностном кипении в узких кольцевых каналах // Теплоэнергетика. 1963. №5. С.83–85.
7. **Надеев А.Т.** К вопросу о возникновении пузырькового кипения жидкости // Теплоэнергетика. 1976. №7. С.68–70.
8. **Чернобай В.А.** Определение условий возникновения пузырькового кипения при вынужденном движении недогретой жидкости. // Теплоэнергетика. 1970. № 6. С.72–74.
9. **Луцет М.О.** Визуализация переходных процессов в окрестности границы смены режимов кипения на плоском нагревателе // Труды 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Издательство МЭИ, 2002. Т.4. С.135–137.