

А.В. Овсянник

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КИПЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Одним из перспективных направлений передачи больших тепловых потоков является организация процесса кипения жидкостей на теплоотдающих поверхностях с пористыми покрытиями и с оребрением различного профиля. В этом случае становится возможным создание теплообменных аппаратов и устройств со сравнительно малыми габаритно-весовыми показателями. При этом, кроме того, необходимо добиваться передачи больших тепловых потоков при сравнительно малых температурных напорах и повышенных коэффициентах теплоотдачи в области развитого пузырькового кипения, не допуская образования кризисного режима кипения, когда появляющаяся паровая пленка становится фактором, ограничивающим применение той или иной теплоотдающей поверхности. Многочисленные исследования [1] посвящены частным и общим закономерностям теплообмена при кипении различных жидкостей на твердых поверхностях нагрева в большом объеме и при вынужденном движении парожидкостной смеси у поверхности нагрева и значительно меньше вопросам переноса теплоты и массы в кольцевых каналах и щелях различной ориентации как при свободном движении, так и при вынужденном. Кроме того, при исследовании таких схем процесса кипения не дается, как правило, ответа на вопрос, влияют ли условия стеснения на процесс кипения и как они влияют на величину температурного напора, коэффициента теплоотдачи, режима движения парожидкостной смеси у поверхности нагрева и т. д.

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований по кипению воды на гладкой и оребренной поверхностях в горизонтальном кольцевом канале. Геометрические параметры канала и экспериментальных образцов представлены в табл.1,

Таблица 1

№об- разца	d_0 , мм	D_0 , мм	$d_{вн}$, мм	S_p , мм	δ_0 , мм	l_0 , мм	δ_T , мм	$\delta_{ср}$, мм	F_0 , м ²	F_n , м ²	D , мм	d_0/D D_0/D
1	25	–	16	–	–	320	–	–	$2,5 \cdot 10^{-2}$	–	70	0,357
2	25	50	16	4	4	320	4	4	–	$1 \cdot 10^{-1}$	70	0,714

где d_0 – диаметр образца по основной поверхности; D_0 – наружный диаметр ребра; $d_{вн}$ – внутренний диаметр образца; S_p – шаг ребра; δ_0 – толщина ребра у его основания; l_0 – длина образца; δ_T – толщина торца ребра; $\delta_{ср}$ – средняя толщина ребра; F_0 – площадь образца по основной поверхности; F_n – полная наружная площадь образца; D – наружный диаметр кольцевого канала; d_0/D – относительный размер кольцевого канала.

Для проведения экспериментов была создана установка, испытательный узел которой показан на рис.1, а образцы – на рисунке 2. Жидкость, догретая до

температуры насыщения при данном давлении, подавалась через нижний патрубок в кольцевой канал, а паровая фаза беспрепятственно отводилась через верхний патрубок. Образцы изготавливались из дюралюминия. Испытательный узел имел смотровое окно для визуального наблюдения за процессом кипения. Процесс кипения проходил практически при свободном движении жидкости (скорость движения жидкости, подаваемой через нижний патрубок, составляла около 0,01 м/с). Внутри каждого образца находился электронагреватель. На основной поверхности образцов и на ребрах фрезеровались канавки для установки термопар, которые затем зачеканивались вкладышами.

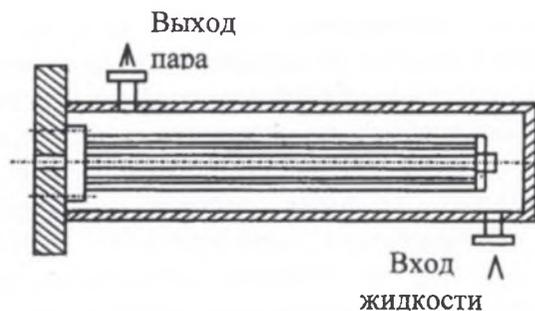


Рис.1. Испытательный узел

При обработке экспериментальных данных за температуру насыщения принималась температура, измеренная двумя термопарами, расположенными в паровом пространстве и, кроме того, их показания контролировались образцовым манометром.

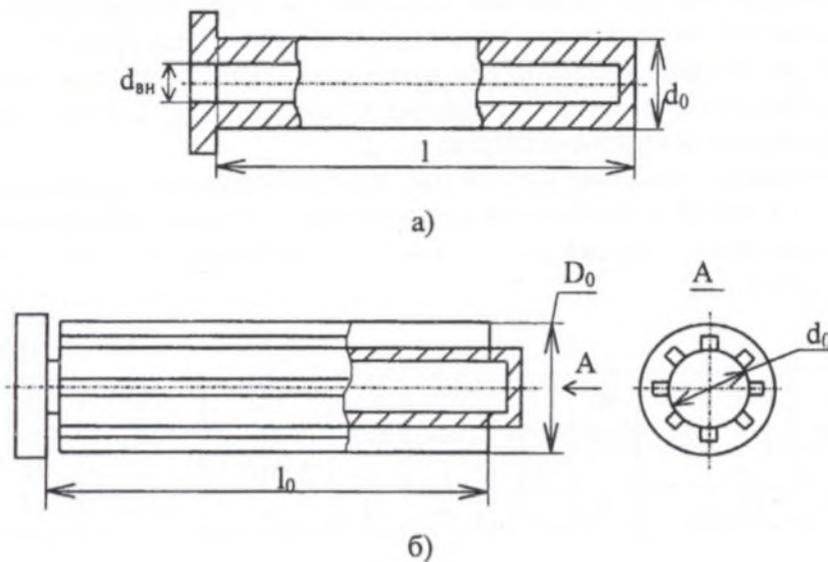


Рис.2. Образцы трубок: а – гладкая трубка; б – оребренная

За температуру поверхности принималась средняя из результатов измерения девяти термопар, расположенных в трех сечениях.

Температура поверхности ребра измерялась в трех точках: у основания, в среднем сечении ребра и на торце ребра.

Мощность электронагревателя W , измеренную ваттметром, относили к полной наружной поверхности гладкого и оребренного образцов.

Коэффициент теплоотдачи α рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{q}{t_{ст} - t_0} \quad (1)$$

Результаты экспериментов по кипению воды в кольцевом канале на гладкой и продольно оребренной трубках (образцах) представлены на рис. 3 и 4.

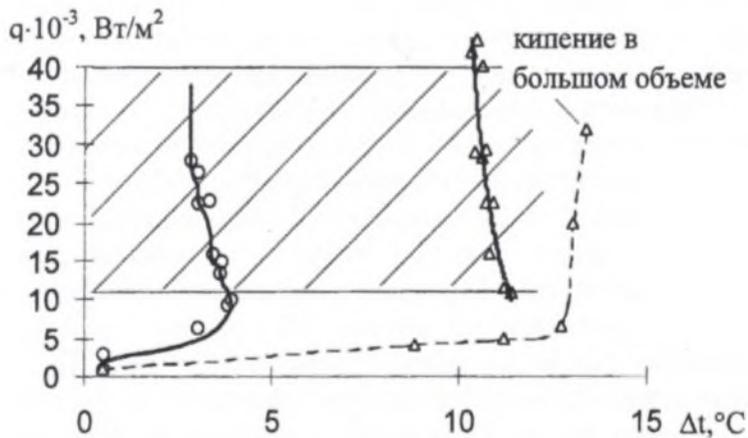


Рис.3. Зависимость $q=f(\Delta t)$:

Δ – гладкая труба;

о – оребренная труба

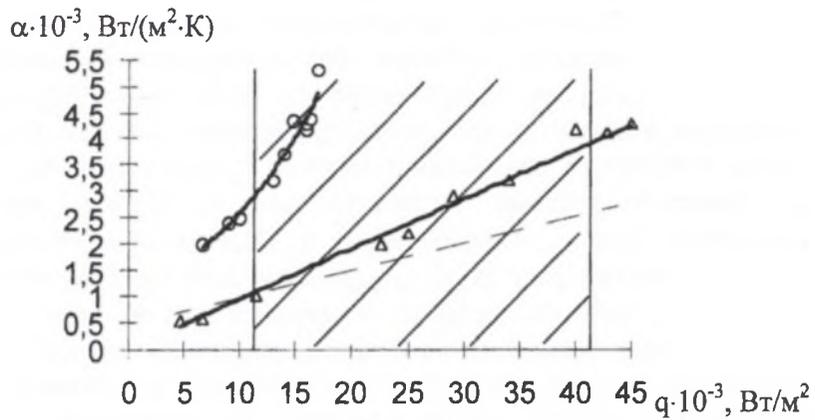


Рис.4. Зависимость $\alpha=f(q)$:

Δ – гладкая труба;

о – оребренная труба

Как видно из графических зависимостей, коэффициенты теплоотдачи при кипении жидкостей на ребристой поверхности значительно выше, чем на гладкой и, кроме того, режим развитого кипения наступает при меньших значениях плотности теплового

потока q и температурного напора Δt . Как показывают некоторые авторы, в частности в работе [2], при кипении в большом объеме увеличение интенсивности теплоотдачи при кипении на ребренных поверхностях связано со своеобразием условий возникновения, роста и отрыва пузырей. Процесс кипения на ребристой поверхности продолжается при меньших температурных напорах, чем на гладкой. Авторы связывают это с особенностями теплообмена и гидродинамики, которые создают более благоприятные условия для зарождения и роста паровых пузырей.

Зарождение пузырей происходит у основания ребер, где имеется наибольший перегрев жидкости, что приводит к увеличению толщины перегретого слоя, а это улучшает условия роста паровых пузырей. Кроме того, в процессе роста и подъема пузыря происходит сильное испарение жидкости в пузырь из слоя перегретой жидкости, заключенной между ним и ребром. На интенсификацию процесса теплообмена на ребристой поверхности существенное влияние оказывает гидродинамика процесса. Ребра вызывают турбулентные пульсации при росте, отрыве и подъеме пузыря, что усиливает интенсивность теплообмена [2].

Теплообмен при кипении в кольцевом канале по сравнению с кипением в большом объеме имеет свои особенности как при кипении на гладкой теплоотдающей поверхности, так и на ребренной. Визуальные наблюдения показали, что первые центры парообразования возникают на нижней образующей гладкой трубки и в межреберном пространстве ребренной трубки (у основания ребра) [3,4].

Для гладкой трубки режим свободной конвекции наблюдался до значения плотности теплового потока примерно равной 8500 Вт/м^2 , а развитое кипение наступало при $q=11500\div 11800 \text{ Вт/м}^2$.

Для ребренной трубки эти режимы были соответственно 6700 Вт/м^2 и 9400 Вт/м^2 .

С увеличением тепловой нагрузки увеличивалась плотность центров парообразования, мелкие пузыри сливались в более крупные, происходил их отрыв и они скользили по поверхности, увеличивая свой объем [3].

На ребренной трубке наблюдалось «пенообразное» скопление пузырей на торцевой части ребра, затем на нижней части ребрения образовывалась пузырьковая прослойка, которая заполняла межреберное пространство по всей длине образца, которая устойчиво сохранялась, а достигнув края ребра, происходил ее отрыв. При изменении тепловой нагрузки в обратном направлении картина процесса кипения сохранялась, однако режим развитого кипения распространялся на область, ранее занятую свободной конвекцией. Даже при $q\leq 300 \text{ Вт/м}^2$ на нижней образующей ребристой поверхности наблюдались центры парообразования с низкой частотой отрыва [3]. При наступлении развитого режима кипения в верхней части кольцевого канала наблюдалась практически сплошная паровая прослойка, которая «отжимала» свободную поверхность кипящей жидкости к теплоотдающей поверхности, увеличивая степень турбулизаций и частоту отрыва пузырей, что приводило к увеличению теплоотдачи по сравнению с кипением в большом объеме.

Кроме того, при наступлении развитого режима кипения как для гладкой трубки, так и для ребренной в области значений $q=11500\div 42500 \text{ Вт/м}^2$ наблюдалось не увеличение температурного напора Δt , а его снижение на $2\div 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис.3.). В этой области q температурный напор оставался постоянным и только при $q=42500 \text{ Вт/м}^2$ температурный напор начинал опять расти.

Такое «поведение» Δt можно объяснить следующим образом: общеизвестно, что при

кипении в большом объеме с увеличением плотности теплового потока температурный напор $\Delta t = t_n - t_n$ возрастает пропорционально q [1] и при всплытии пузыря на него не оказывается какого-нибудь столь заметного внешнего воздействия. При кипении же в кольцевом канале появляется такой элемент «стеснения», как наружная поверхность кольцевого канала, препятствующая всплытию парового пузыря и увеличивающая гидродинамическое сопротивление движению парожидкостной смеси, что способствует появлению в ней градиента давления, приводящего к более интенсивному отводу паровой фазы, а значит, и тепловой энергии от теплоотдающей поверхности. Следовательно, в данной области плотности теплового потока фактор градиента давления («стеснение»), приводящий к увеличению коэффициента теплоотдачи и снижению Δt , превалирует над фактором увеличения Δt с увеличением q . На рис. 3 и 4 эта область выделена. Эта особенность зависимости $q=f(\Delta t)$ характерна как для гладкой, так и для оребренной трубок.

Выводы

Интенсификация процесса теплообмена при кипении жидкостей в кольцевых каналах происходит за счет появления градиента давления, приводящего к увеличению коэффициента теплоотдачи, степени турбулизации парожидкостной смеси и уменьшению температурного напора между температурой поверхности и температурой насыщения.

Обозначения

q – плотность теплового потока; Δt – температурный напор; α – коэффициент теплоотдачи; $t_{ст}$ – средняя температура поверхности; t_0 – температура насыщения.

Литература

1. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин А.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1977.
2. Дюндин В.А. Исследование теплообмена при кипении фреона-12 на гладкой и ребристой трубках // Холодильная техника. 1972. №6.
3. Овсянник А.В., Вальченко Н.А., Иванова Е.М., Гурко В.В. Исследование процессов теплообмена при кипении жидкости на оребренных поверхностях в горизонтальных кольцевых каналах: Материалы XII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». М., 1999, с.244-246.
4. Овсянник А.В., Вальченко Н.А., Иванова Е.М., Гурко В.В. Теплообмен при кипении жидкостей в горизонтальных кольцевых каналах: Материалы XII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». М., 1999, с.247-249.